

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

## **DIPLOMSKI RAD**

Inge Vinković

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

## **DIPLOMSKI RAD**

Mentori:

Dr. sc. Dorian Marjanović  
Dr. sc. Nenad Bojčetić

Inge Vinković

Zagreb, 2009.

U ovom radu opisan je razvoj vertikalne vjetroelektrane za mala kućanstva koja se može lako montirati na objekt. Da bi se pristupilo razvoju bilo je potrebno istražiti područja koja su direktno povezana s ovakvom vrstom uređaja.

U radu se opisuje se nastanak kinetičkog oblika sunčeve energije koji nazivamo vjetar, utjecaj površine zemlje na njegov intenzitet, njegova učestalost na različitim visinama, te osnovni parametri pomoću kojih možemo pretpostaviti mogućnost pojave vjetra na nekom području uz prethodno mjerenje. S obzirom na prirodu vjetra razjašnjava se zašto su neka područja na površini zemlje pogodna za iskorištavanje energije vjetra dok neka to nisu.

Opisuju se razlike između osnovnih konstrukcijskih oblika vjetroturbina koje koriste kinetičku energiju vjetra za pogon radnog stroja, ili u novije vrijeme generatora, uz podjelu na vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje i vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje. Definira se stupanj učinkovitosti vjetroturbina te koeficijent brzohodnosti.

Daju se osnovne činjenice vezane uz pohranu i korištenje električne energije proizvedene putem vjetroatagregata te mogućnosti spajanja malog izvora električne energije na mrežu. Dana je i podjela generatora koji se mogu koristiti u tu svrhu prema njihovom načinu rada.

Navode se konstrukcije vjetroturbina koje se danas mogu naći na tržištu ali i neki idejni projekti koji se javljaju kao reakcija na veliki potencijal vjetra kao energenta.

Napravljena je analiza potreba za električnom energijom dvočlanog domaćinstva koje koristi električne uređaje uobičajene za život u gradu. Izrađeni su tehnički upitnik, definicija cilja, funkcijska analiza i morfološke matrica vjetroturbine za kućnu upotrebu. Putem morfološke matrice odabrana su tri koncepta od kojih je odabran onaj koji prema analizi potreba korisnika ima najbolje karakteristike. Prema odabranom konceptu izrađen je 3D model vjetroturbine i učvršćenja na stambeni objekt. Također je napravljen i proračun konstrukcije turbine za brzinu vjetra od 16 m/s te je izrađena potpuna tehnička dokumentacija za danu konstrukciju.

POPIS SLIKA.....	4
POPIS TABLICA I DIJAGRAMA.....	6
IZJAVA.....	9
1. Uvod.....	10
2. Energija i snaga vjetra.....	11
2.1. Parametri vjetra.....	16
2.2. Pozicioniranje turbne.....	21
3. Konstrukcijski oblici vjetroturbina.....	23
3.1. Podjela vjetroturbina.....	23
3.1.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje ili VSHO.....	23
3.1.1.1. Broj lopatica.....	24
3.1.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje ili VSVO.....	25
3.1.2.1. Darrieusova vjetroturbina.....	25
3.1.2.2. Savoniusova vjetroturbina.....	28
4. Značajke rada vjetroturbina.....	30
4.1. Stupanj učinkovitosti vjetroturbine.....	30
4.2. Koeficijent brzohodnosti.....	32
5. Proizvodnja električne energije.....	33
5.1. Generatori električne energije prikladni za rad vjetroturbina.....	33
5.1.2. Usporedba sinkronog i asinkronog generatora.....	36
5.2. Spajanje vjetroelektrane u elektroenergetski sustav.....	37
6. Novi konstrukcijski oblici vertikalnih vjetroturbina.....	38
6.1. Konstrukcijski oblici vjetroturbina na tržištu i njihova usporedba.....	38
6.1.1. Helix wind.....	38
6.1.2. Quiet revolution.....	40
6.2. Usporedba navedenih vjetroturbina.....	41
6.3. Idejni projekti vertikalnih vjetroturbina.....	42
6.3.1. Wing.....	42
6.3.2. Tesnic.....	43
6.3.3. Bri domestic wind turbine.....	45
6.3.4. Magenn mars.....	46
6.3.5. Aerogenerator.....	49
6.4. Izumi bez podataka o snazi.....	50
7. Arhitektura u skladu s energijom vjetra.....	51
8. Potrebe za električnom energijom u kućanstvu.....	53
9. Razvoj vjetroturbine.....	55
10. Razrada odabranog koncepta.....	65
11. Proračun.....	66
12. Prikaz 3D modela i troškova.....	74
Zaključak.....	76

Literatura.....	77
-----------------	----

Prilog - Tehnička dokumentacija	
---------------------------------	--

- Slika 2.1. Temperature mora
- Slika 2.2. Smjer globalnog vjetra
- Slika 2.3. Obalna cirkulacija vjetra
- Slika 2.4. Smjer planinskog vjetra
- Slika 2.5. Promjena brzine vjetra s visinom
- Slika 2.6. Promjena brzine vjetra s visinom
- Slika 2.7. Krivulje učestalosti brzina vjetrova na visinama 10, 25, 50 i 100 metara od tla
- Slika 2.8. Porast snage vjetra s brzinom
- Slika 2.9. Spektar snage vodoravne komponente brzine vjetra
- Slika 2.10. Weibullova razdioba
- Slika 2.11. Utjecaj prepreke na strujanja
- Slika 2.12. Brzine strujanja vjetra danju i noću
- Slika 2.13. Ruža vjetrova
- Slika 2.14. Europska karta vjetrova
- Slika 2.15. Karta vjetrova za područje otoka Paga
- Slika 3.1. Izvedba sa stupom ispred lopatica i izvedba sa stupom iza lopatica
- Slika 3.2. "Američka" vjetroturbina
- Slika 3.3. Darrieusova vjetroturbina
- Slika 3.4. Brzine i sile na presjeku lopatica
- Slika 3.5. H-tip turbine
- Slika 3.6. Shema sustava za okretanje lopatica
- Slika 3.7. Spiralna vjetroturbina
- Slika 3.8. Horizontalne izvedbe Darrieusovih vjetroturbina
- Slika 3.9. Savoniusova vjetroturbina
- Slika 3.10. Princip rada Savoniusove vjetroturbine
- Slika 3.11. Spiralna Savoniusova vjetroturbina
- Slika 4.1. Shematski prikaz strujanja fluida kroz disk rotora
- Slika 4.2. Koeficijent  $C_p$  s obzirom na  $\frac{v_2}{v_1}$
- Slika 4.3. Promjena koeficijenta korisnosti s promjenom koeficijenta brzohodnosti
- Slika 5.1. Karakteristika momenta asinkronog stroja za jedan smjer vrtnje polja
- Slika 5.2. Priključenje na mrežu
- Slika 6.1. Helix Wind vjetroturbina
- Slika 6.2. Modularna nadogradnja Helix vjetroturbine
- Slika 6.3. Turbulentno strujanje vjetra kada nailazi na prepreku
- Slika 6.4. Quiet revolution turbina
- Slika 6.5. Wing vjetroturbina s solarnim kolektorima

Slika 6.6. Pokretanje pri malim brzinama vjetra i prilagodba lopatica velikim brzinama vjetra

Slika 6.7. Prikaz slaganja diskova unutar Tesnic vjetroturbine

Slika 6.8. Unutrašnjost vjetroturbine Tesnic i sklop uređaja

Slika 6.9. Konstrukcija Bri Domestic vjetroturbine i njena skica

Slika 6.10 Letjelica "Lakša od zraka"

Slika 6.11. MARS vjetroturbina

Slika 6.12. MARS turbine velikih snaga na velikim visinama

Slika 6.13. Aerogenerator

Slika 6.14. Vjetroturbina Graemea Atteya

Slika 6.15. Mag – Wind vjetroturbina

Slika 7.1. Koncept građevine s instaliranim vjetroturbinama (1)

Slika 7.2. Koncept građevine s instaliranim vjetroturbinama (2)

Slika 7.3. Prva građevina s instaliranim vjetroturbinama (3)

Slika 9.1. Funkcijska struktura

Slika 9.2. Koncept 1 – lopatice

Slika 9.3. Koncept 2 - lopatice

Slika 9.4. Koncept 3 – lopatice

Slika 10.1. Razrada lopatica s dodatnim dijelovima

Slika 12.1. Generator GL-PMG-500A

Slika 12.2. 3D model sklopa vjetroelektrane

Slika 12.3. 3D model modula lopatica

Tablica 2.1. Parametri za proračun brzine vjetra prema European Wind Atlas

Tablica 2.2. Beaufortova ljestvica jačine vjetra

Tablica 5.1. Sinkrone brzine vrtnje za razne brojeve pari polova

Tablica 5.2. Usporedba generatora

Tablica 5.3. Prednosti i nedostaci direktnog pogona u odnosu na pogon s multiplikatorom

Tablica 6.1. Usporedba snage i dimenzija vjetroturbina

Tablica 6.2. Usporedba snage i dimenzija vjetroturbina istih dimenzija

Tablica 6.3. Modeli Tesnic vjetroturbina

Tablica 8.1. Električni uređaji u kućanstvu

Tablica 8.2. Dnevna potrošnja električne energije u kilovat satima

Tablica 8.3. Dnevna potrošnja u vatima

Tablica 9.1. Glavne potrebe korisnika

Tablica 9.2. Morfološka matrica

Tablica 9.3. Ocjenjivanje koncepata

Dijagram 6.1. Snaga u ovisnosti o brzini vjetra i energija dobivena kroz godinu u ovisnosti o prosječnoj brzini vjetra



## Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

$A$	- površina	$m^2$
$A$	- parametar odnosa veličine	$ms^{-1}$
$b_1$	- faktor veličine	
$b_2$	- faktor kvalitete površine	
$C_{p,max}$	- koeficijent maksimalne korisnosti	
$C_p$	- koeficijent korisnosti	
$C$	- dinamička nosivost	kN
$C_1$	- dinamička opterećenost ležaja	kN
$C_0$	- statička opterećenost ležaja	kN
$d_x$	- promjer vratila na mjestu presjeka $x$	mm
$\dot{E}$	- snaga	W
$E$	- modul elastičnosti	$N\ mm^{-2}$
$F$	- sila	N
$F_r$	- radijalna sila	N
$f(v)$	- frekvencija događanja određene brzine vjetra	%
$f$	- progib	mm
$J_1$	- moment tromosti	$mm^4$
$k$	- parametar oblika vjetra	
$L_{10}$	- nominalni vijek trajanja ležaja	milijuni okretaja
$\dot{m}$	- protok mase u vremenu	$kg\ s^{-1}$
$M$	- moment	Nm
$M_{red_3}$	- reducirani moment	Nm
$P$	- snaga	W
$P_{max}$	- maksimalna snaga	W
$P_0$	- statička nosivost	kN
$\Delta p$	- promjena tlaka	Pa
$q$	- kontinuirano opterećenje	$Nm^{-1}$
$R_m$	- naprezanje pri maksimalnoj sili	$N\ mm^{-2}$
$S_{potr.}$	- potrebna sigurnost	
$S_{post.}$	- postojeća sigurnost	
$T$	- moment torzije	Nm
$v$	- brzina vjetra	$ms^{-1}$
$v_r$	- brzina vjetra na referentnoj visini	$ms^{-1}$
$v_{sr}$	- srednja brzina	$ms^{-1}$
$v_1$	- brzina vjetra ispred rotora	$ms^{-1}$
$v_2$	- brzina vjetra iza rotora	$ms^{-1}$
$W$	- moment otpora	$mm^3$
$X$	- radijalni faktor ležaja	
$Y$	- aksijalni faktor ležaja	
$z$	- visina koju tražimo	m
$z_r$	- referentna visina mjerenja	m

$z_0$	- visina hrapavosti površine	m
$\alpha$	- koeficijent hrapavosti površine	
$\alpha_0$	- faktor čvrstoće materijala	
$\beta$	- nagib elastične linije	rad
$\beta_{kf}$	- faktor zareznog djelovanja	
$\lambda$	- koeficijent brzohodnosti	
$\omega$	- brzina vrtnje	rad s <sup>-1</sup>
$\rho$	- gustoća fluida	kg m <sup>-3</sup>
$\rho$	- faktor udara	
$\sigma_{fDN}$	- savojno naprezanje za materijal	N mm <sup>-2</sup>
$\sigma_f$	- savojno naprezanje	

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno služeći se stečenim znanjem i dostupnom literaturom.*

*Zahvala:*

*Zahvaljujem mentorima, profesoru dr. sc. Dorianu Marjanoviću i docentu dr. sc. Nenadu Bojčetiću na podršci i korisnim savjetima.*

*Zahvaljujem se asistentu dipl. ing. Danijelu Rohdeu na ukazanim pogreškama u radu, docentu dr. sc. Hrvoju Kozmaru na informacijama vezanim uz područje mehanike fluida. Kolegi s posla Alanu Drešaju, te šefovima dipl. ing. Hrvoju Kopreku i mag. Mati Bilošu na velikom razumjevanju. Također se zahvaljujem svim anketiranim prijateljima, kolegama i poznanicima.*

*Od srca se zahvaljujem svojoj obitelji i dečku na podršci i strpljenju pri izradi rada.*

## 1. Uvod

U posljednje vrijeme sve smo svjesniji činjenice da svojim načinom života izazivamo velike promjene Zemljinog eko sustava. Te iste promjene, s obzirom da smo dio tog sustava, utječu izravno na nas. Iz tog razloga sve se više budi svijest ljudi o potrebi za velikim promjenama vezanim uz način dobivanja energije.

Jedan od oblika energije koji svakodnevno koristimo je električna energija. Glavna prednost električne energije je mogućnost njenog lakog transporta do krajnjeg korisnika. Problem koji se javlja je proizvodnja, naime najveći udio u svjetskoj proizvodnji el. energije imaju termoelektrane koje koriste fosilna goriva. Osim što su ograničen resurs, fosilna goriva značajno zagađuju Zemljinu atmosferu.

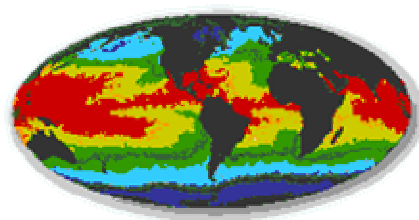
Iz navedenih razloga javlja se potreba za novim, alternativnim izvorima energije. U svojoj okolini primjećujemo velike potencijale prirodnih izvora energije kao što su sunčeva energija, energija vjetra, energija oceana, geotermalna energija, biogoriva i sl. Da bi se ti izvori iskoristili, potrebni su uređaji koji će tu energiju pretvoriti u željeni oblik. Uobičajeno je da se takvi uređaji grupiraju te na taj način tvore elektrane koje proizvode el. energiju za široku potrošnju. Zbog raznih čimbenika kao što su razvoj tehnologije, svijest o ekologiji i potreba za jeftinijom energijom svjedoci smo sve većeg porasta broja objekata koji imaju instaliran neki od sustava za iskorištavanje alternativnih izvora energije tzv. samoodrživi objekti. Da bi se netko odlučio za kupnju ovakvog uređaja karakteristike proizvoda moraju zadovoljiti osnovne uvjete kao što su: zadovoljavajuća iskoristivost, prihvatljiva cijena, lako održavanje i sl. Izrada ovakvog uređaja zahtjeva razumijevanje nekih osnovnih pojmova te je neophodno opisati energent koji će se koristiti, analizirati uređaj za pretvorbu mehaničke energije u električnu te proučiti već postojeće konstrukcije takvih uređaja na tržištu. Time se pokušavaju umanjiti nedostaci postojećih proizvoda te se razmatraju mogućnosti za povećanje ukupnog učinka. Bitno je naglasiti da je niska cijena jedan od glavnih faktora koji se mora zadovoljiti, a budući da konstrukcija nije predviđena za masovnu proizvodnju bitno je da proizvodnja po komadu bude u startu jeftina stoga materijali moraju biti lako dostupni, a tehnološki postupci jednostavni.

Kao što je već navedeno jedan od alternativnih izvora energije jest vjetar. Po svojoj prirodi vjetar je oblik sunčeve energije i kao takav ubraja se u obnovljive izvore. Uređaji koji se koriste za pretvorbu energije vjetra u mehaničku energiju nazivaju se vjetroturbine. Kroz povijest vjetroturbine su se koristile za izravan pogon radnih strojeva, no u današnje vrijeme dobivena mehanička energija pretvara se u električnu. Za takvu pretvorbu u najvećem se broju slučajeva koriste vjetroturbine horizontalnog tipa, no nedostaci takvih turbina postaju vidljivi na područjima gdje vjetar nema stalnu struju i gdje se javljaju udari (npr. bura). Izuzetno su nepogodne za vjetar koji brzo mijenja svoj smjer (turbulentne struje). Rješenje ovih i drugih problema horizontalne izvedbe rješava vertikalna izvedba vjetroturbine. Poznavajući prirodu vjetra u našim krajevima sasvim je prirodno odlučiti se za vertikalnu izvedbu. Vertikalna vjetroturbina koja će se relativno lako instalirati na stambeni objekt plijeni pažnju mnogih koji se već bore za svoj komad tržišta. Odgovor na pitanje koliko je ovakav sustav koristan, isplativ i siguran te da li je uopće potreban, pokušati će se dati u ovom radu.

## 2. Energija i snaga vjetra

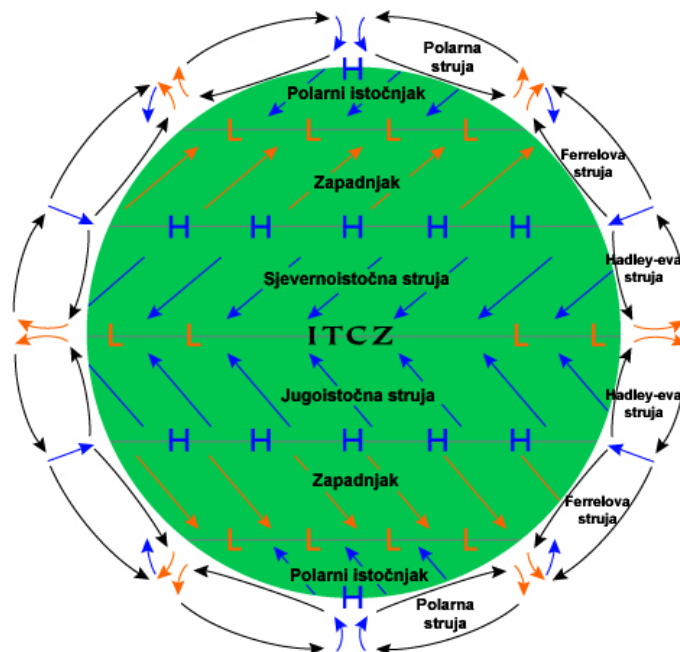
Snaga koju Zemlja dobiva zračenjem od Sunca je  $1.74 \cdot 10^{17}$  W od čega se 1 do 2% pretvara u snagu vjetra. Gibanje zračnih masa u atmosferi javlja se zbog neravnomjernog zagrijavanja površine Zemlje na različitim geografskim širinama zbog toga što se zrak zagrijava indirektno preko tla. Polovi Zemlje dobivaju manje energije od ekvatora, a kopno se grije brže od mora. Zbog razlika temperatura u slojevima zraka stvaraju se razlike tlaka koji se pretvara u kinetički oblik energije vjetra. Ciklusi strujanja zraka izmjenjuju se različitom snagom i različitim periodima trajanja ovisno o utjecajnim čimbenicima. Promjene temperature i tlaka u slojevima zraka obnavljaju se neprekidno ovisno o klimatskim promjenama na Zemlji.

Globalni vjetrovi pušu od ekvatora prema hladnim Zemljinim polovima. Kako je topli zrak lakši od hladnog on se na ekvatoru podiže do visine od otprilike 10 km te putuje prema sjevernom i južnom polu.



Slika 2.1. Temperature mora

Coriolisova sila djeluje na vektor brzine vjetra. Coriolisovu komponentu generira vrtložno strujanje kao posljedica rotacije Zemlje. Takva kombinacija vertikalnog i horizontalnog pomaka tvori tri zone tj. tri struje. Hadley-evu struju, Ferrelovu struju i Polarnu struju.



Slika 2.2. Smjer globalnog vjetra

Coriolis-ova sila uzrokuje strujanje do  $30^\circ$  geografske širine s gornje i donje strane hemisfere, a tada se javlja polje visokog tlaka koje se jednim dijelom vraća prema ekvatoru a jednim kreće dalje prema polu. Zatvorena struja koje se vraća natrag naziva se Hadley-eva struja, a dio struje koji kreće prema polu radi i vrtlog na  $60^\circ$  geografske širine naziva se Ferrelova struja. Kao i u prethodnom slučaju dio vrtloga se vraća a dio odlazi još dalje ka polu te tvori Polarnu struju. Na polovima zrak je ohlađen i spušta se kao hladna suha fronta visokog tlaka uvijajući se prema zapadu uslijed Coriolis-ovog efekta stvarajući proljetne vjetrove. Kod svakog prijelaza između dva vrtloga zrak se spušta na nižu visinu jer se hladi pa je tako na najvećoj visini kod ekvatora a na najnižoj na polovima.

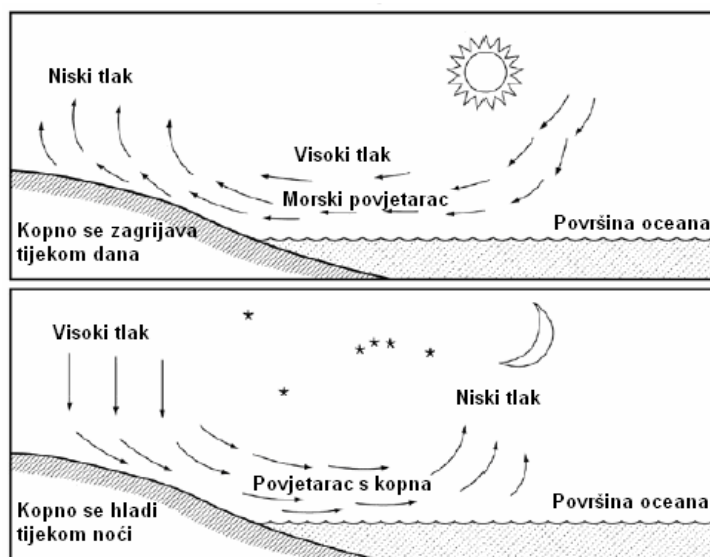
Ferrelova struja je sekundarno strujanje koje ovisi o Hadley-evoj i Polarnoj struji, ponekad se naziva i zonom miješanja. Ispod te zone često se nalaze zapadni vjetrovi.

Gore opisani vjetrovi nalaze se na visinama od 1000 m iznad zemljine površine i na njih ne utječe Zemljino tlo. S druge strane površinski vjetrovi ovise o tlu do 100 metara visine. Upravo su površinski vjetrovi ti koji su bitni za analizu energetske učinkovitosti vjetra kakva je potrebna za vjetroelektrane.

Lokalne vjetrove pokreću razlike u temperaturi kopna i mora te udolina i visova. Iako su globalni vjetrovi važni za određivanje prevladavajućih vjetrova u određenom području, lokalni klimatski uvjeti mogu prevladati utjecaj uobičajenih smjerova vjetra. Lokalni vjetrovi se uvijek dodaju sistemima vjetrova veće skale, tj. na smjer vjetra utječe suma globalnih i lokalnih efekata. Kada je vjetar više skale slab, lokalni vjetar može dominirati uzorkom.

### Obalna cirkulacija

Tijekom dana kopno se zagrijava brže nego more. Zrak se podiže i odlazi prema moru gdje se stvara područje niskog tlaka koje privlači hladan zrak s površine vode. U suton se često događa da su temperature mora i kopna izjednačene i tada nema vjetra.

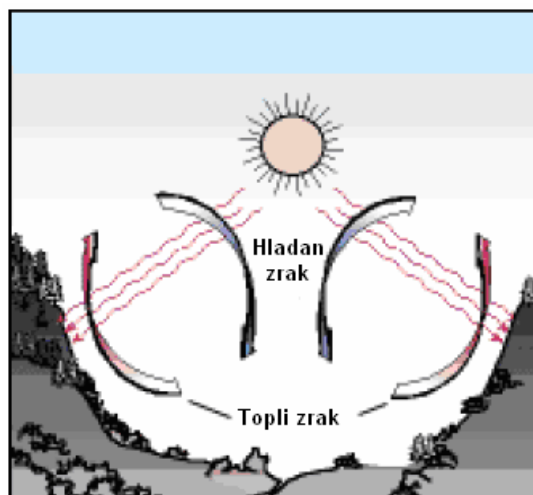


Slika 2.3. Obalna cirkulacija vjetra

Tijekom noći vjetar puše u suprotnom smjeru i uglavnom ima manje brzine zbog toga što je razlika u temperaturi između kopna i mora noću manja.

## Planinski vjetrovi

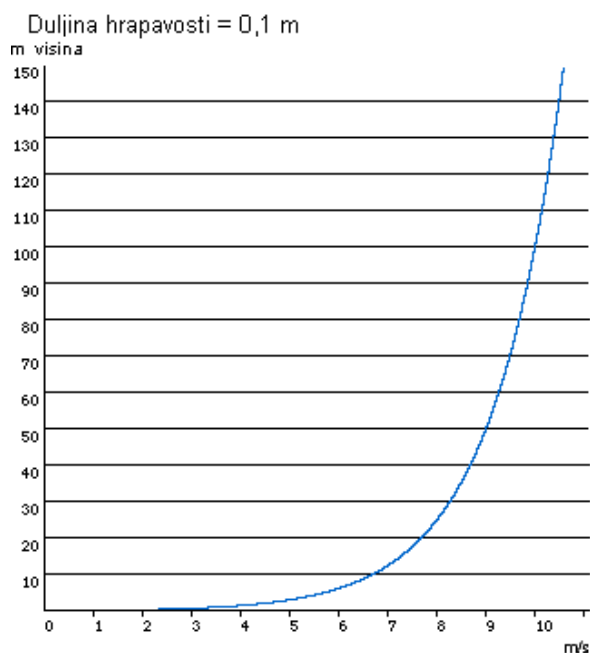
Planinski vjetrovi nastaju zbog geometrije i neravnomjernog zagrijavanja tla. Vrh padine zagrijava se brže od dna. Kada se zrak pri vrhu zagrije preuzimajući toplinu od tla njegova gustoća se smanjuje te se on uzdiže prema vrhu prateći površinu padine, stvara se područje niskog tlaka i nastaje vjetar. Efekt se povećava ako je dno padine u hladu pa je time razlika u temperaturi još veća. Noću se smjer vjetra mijenja i zrak putuje prema dolje. Ako dolina ima padinu s dvije strane tada se vjetar kreće kroz kanjon u jednom od smjerova.



Slika 2.4. Smjer planinskog vjetra

## Utjecaj hrapavosti površine na jačinu vjetra

Brzina vjetra smanjuje se prema tlu Zemlje. Na samoj površini ona je jednaka nuli zbog sile trenja koja usporava strujanje fluida. Na visinama od otprilike jednog do dva kilometra tlo nema skoro nikakvog utjecaja na vjetar.



Hrapavost površine ima veliki utjecaj na brzinu vjetra pa tako s porastom hrapavosti raste i otpor te se vjetar usporava. Šume i veliki gradovi očito su mjesta velike hrapavosti dok ceste i betonske površine stvaraju vrlo mali otpor gibanju vjetra. Vodene površine stvaraju najmanje otpora vjetru dok s druge strane travnate površine pune grmlja značajno usporavaju vjetar.

Porast brzine vjetra s visinom prisutan je na planinskim prijevojima i vrhuncima. Najveće brzine vjetra pojavljuju se pri vrhu troposfere na oko 12 km iznad tla.

Slika 2.5. Promjena brzine vjetra s visinom

Na temelju meteoroloških mjerenja na standardnim visinama od 10 metara iznad tla i s pripadnim faktorom hrapavosti moguće je izračunati brzinu vjetra na potrebnoj visini od tla, npr. Na visini vrha stupa turbine, a preko te brzine i snagu vjetra.

Proračun brzine vjetra na traženoj visini izračunava se pomoću eksponencijalnog ili logaritamskog zakona. Ipak, ovi zakoni pojednostavljuju raspodjelu brzine vjetra s visinom jer ne uzimaju u obzir efekt topografije terena i moguće prepreke, promjene trenja kao i promjene stabilnosti atmosfere. Pokazani su zakoni primjenjivi za homogeni teren i atmosfersku stabilnost.

Ta promjena profila brzine vjetra po vertikali naziva se okomiti gradijent brzine vjetra.

Vertikalni gradijent brzine definira se:

- Kao eksponencijalna funkcija

$$\frac{v}{v_r} = \left( \frac{z - z_0}{z_r} \right)^\alpha \quad (1)$$

Gdje su:

$v$  - brzina vjetra na visini koja se traži

$z$  - visina koju tražimo

$v_r$  - brzina vjetra na referentnoj visini

$z_r$  - referentna visina mjerenja

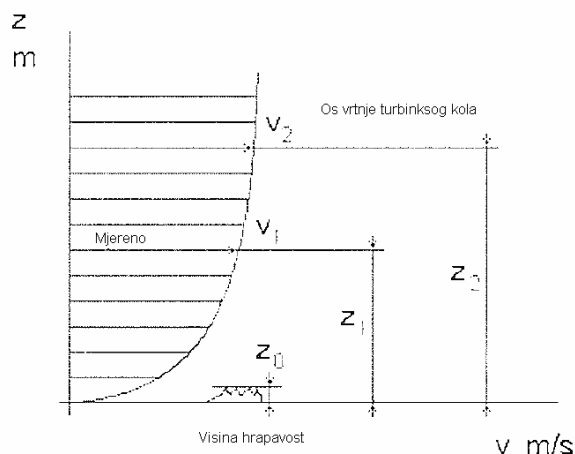
$z_0$  - visina iznad sloja trenja (za nisko raslinje može se uzeti da je jednaka nuli)

$\alpha$  - koeficijent hrapavosti površine (od 0,1 do 0,32)

- Kao logaritamska funkcija

$$v = v_r \frac{\ln(z / z_0)}{\ln(z_r / z_0)} \quad (2)$$

Pomoću danih jednadžbi računaju se brzine vjetra na većim visinama na temelju mjerenja brzine  $v_r$  na visini  $z_r$  koja se obično mjeri na visini od 10 m iznad tla.



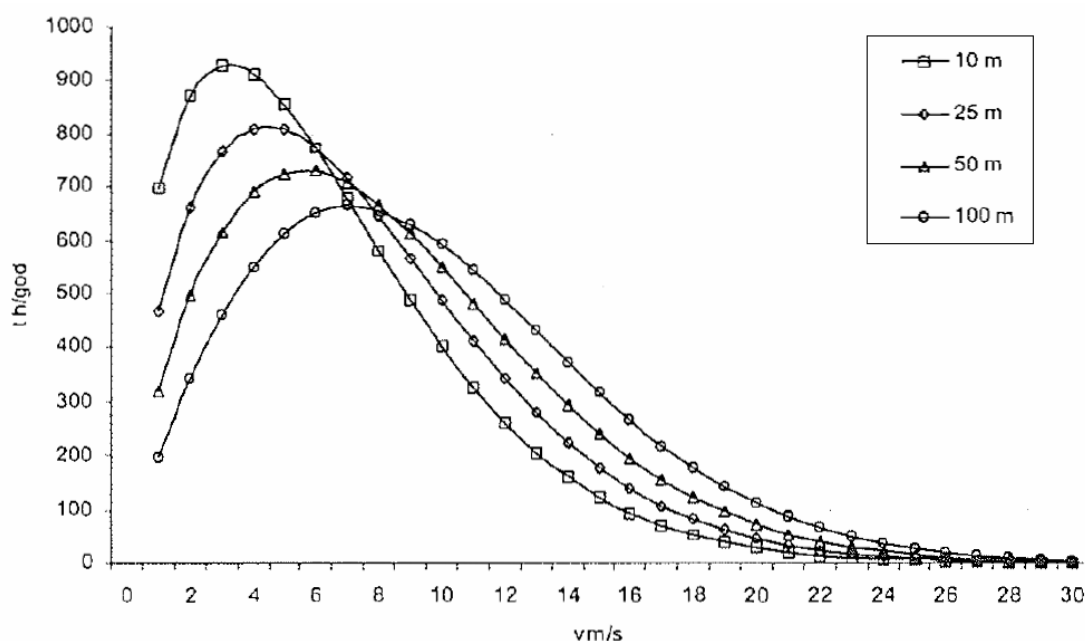
Slika 2.6. Promjena brzine vjetra s visinom



Opis površine	Skupina hrapavosti	Visina hrapavosti $z_0$ , m	Eksponent $\alpha$
Vodne plohe	0	0,0002	0,01
Potpuno otvorene plohe s glatkom površinom, npr. Avionska pista, pokošena trava	0,5	0,0024	-
Otvorena poljoprivredna zemljišta bez ograda i živica, jako udaljene zgrade	1	0,03	0,12
Poljoprivredna zemljišta s pojedinim zgradama i 8 m visokim drvoredima udaljenim oko 1250 m	1,5	0,055	-
Poljoprivredna zemljišta s pojedinim zgradama i 8 m visokim drvoredima udaljenim oko 500 m	2	0,1	0,16
Poljoprivredna zemljišta s puno zgrada, drveća i grmlja ili 8m visokim drvoredima udaljenim oko 250 m	2,5	0,05	-
Sela, manji gradovi, poljoprivredna zemljišta s puno zgrada ili drvoredima, šumom i vrlo neravnim i grubim terenom	3	0,4	0,28
Veći gradovi s visokim zgradama	3,5	0,8	-
Vrlo veliki gradovi s visokim zgradama i neboderima	4	1,6	-

Tablica 2.1. Parametri za proračun brzine vjetra prema European Wind Atlas

Pomoću logaritamske ekstrapolacije i Weibulove korekcije, a na temelju podataka mjerenja razdiobe brzina vjetra u desetomjesečnom razdoblju na visini od 10 m visine od tla, izvedene su krivulje učestalosti trajanja brzina vjetra na visinama 25, 50 i 100 m. Iz slike se vidi da je trajanje nižih brzina vjetra veće na nižim visinama od tla, ali zato je trajanje viših brzina veće na većoj visini od tla.



Slika 2.7. Krivulje učestalosti brzina vjetrova na visinama 10, 25, 50 i 100 metara od tla

## 2.1. Parametri vjetra

Prema Bernoullievoj jednadžbi:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = C \quad (1)$$

$z + \frac{p}{\rho g}$  - potencijalna energija

$\frac{v^2}{2}$  - kinetička energija

Jednadžba opisuje zakon o očuvanju energije čestice fluida određene mase. Potencijalna energija je zbog male mase zraka zanemariva pa iz gornje jednadžbe slijedi da struja vjetra ima samo kinetičku energiju:

$$E_K = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

Masa zraka  $m$  koja struji kroz presjek  $A$  brzinom  $v$ , gustoće  $\rho$ , jednaka je:

$$m = \rho Av \quad (3)$$

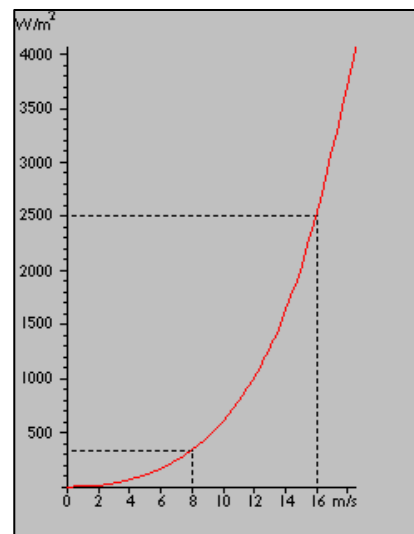
Kada se jednadžba (3) uvrsti u jednadžbu (2) dobivamo:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (4)$$

- $P$  - snaga vjetra u  $W$
- $\rho$  - gustoća zraka u  $kg / m^3$
- $v$  - brzina strujanja vjetra u  $m / s$
- $A$  - površina turbine u  $m^2$

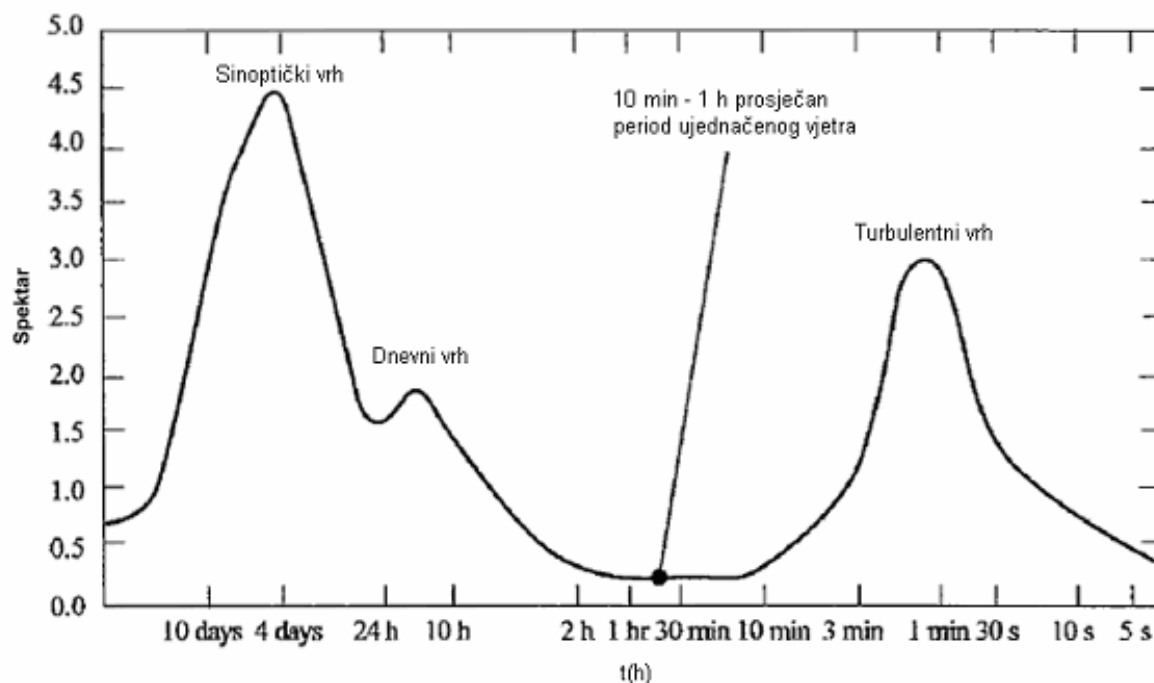
Iz jednadžbe (4) se može vidjeti da snaga  $P$  raste s trećom potencijom brzine vjetra i s površinom  $A$  turbine. Snaga se također mijenja promjenom temperature zraka zbog promjene njegove gustoće no ta promjena se može zanemariti zbog toga što je vrlo malog iznosa.

Snaga vjetra ne može se izračunati bez mjerenja brzine vjetra na određenom području kroz period od godine i više dana. Brzina vjetra mijenja se unutar dijelova sata. Ako se mjerenje brzine vjetra pretvori u spektar snage za jedinicu mase, grafički će se vidjeti dva maksimuma.



Slika 2.8. Porast snage vjetra s brzinom

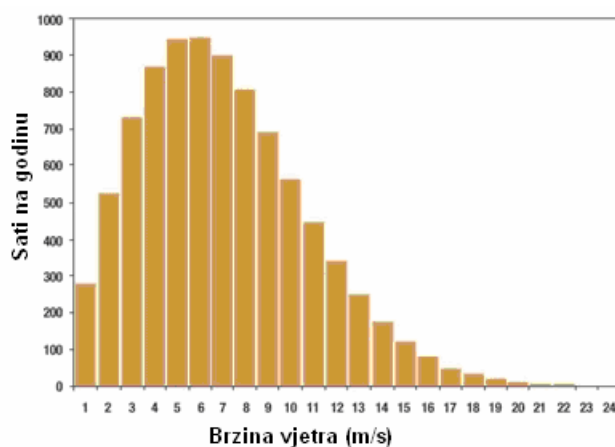
Prvi se maksimum formira u vremenskom periodu od nekoliko dana a odvija se u potlačnom vremenskom sustavu. Drugi vrh pripada snazi kratkog perioda vrtloženja u atmosferi koji traje nekoliko minuta. Prvi maksimum je zbog toga pogodan za korištenje kod vjetroturbina dok je drugi manje interesantan no mora se uzeti u obzir zbog udara vjetra koji izaziva dinamička opterećenja konstrukcije.



Slika 2.9. Spektar snage vodoravne komponente brzine vjetra

Osim ovih varijacija postoje i sezonske varijacije koje se mijenjaju u ciklusima od 1-3 mjeseca.

Zbog promjenjivosti vjetra potrebno je opisati njegovo ponašanje tijekom perioda vremena tj. osrednjavanje. Mjerenje brzine se vrši na visini od 10 m, a period mjerenja bi trebao trajati nekoliko godina. Weibullovom funkcijom najbolje se aproksimiraju prikupljeni podatci. Funkcija daje vjerojatnost pojave neke brzine vjetra tijekom nekog vremenskog perioda.



Slika 2.10. Weibullova razdioba

Na dijagramu se može uočiti da se vjetar vrlo velike jačine javlja rijetko dok je umjereni vjetar vrlo čest. Dani uzorak ima srednju vrijednost brzine od 7 metara u sekundi a oblik krivulje određen je parametrom oblika  $k = 2$ .

Jednadžba ove razdiobe glasi:

$$f(v) = \frac{k}{A} \left( \frac{v}{A} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{A} \right)^k}$$

Gdje su:

- $f(v)$  - frekvencija događanja (vjerojatnost) određene brzine vjetra
- $k$  - parametar oblika vjetra
- $A$  - parametar odnosa veličine (mjere) m/s (predstavlja srednju brzinu vjetra na nekom području)
- $v$  - brzina vjetra m/s

Graf prikazuje distribuciju pojave određenih brzina vjetra u postotcima. Područje ispod krivulje uvijek je 1 budući da je vjerojatnost puhanja vjetra određenom brzinom 100%, uključujući i brzinu od 0 m/s. Pola područja je s lijeve strane vertikalne kod 6,6 m/s. Ta vertikala naziva se median distribucije. To znači da je će pola vremena vjetar puhati brzinom manjom od 6,6 m/s a pola vremena većom brzinom od 6,6 m/s. S druge strane srednja vrijednost brzine vjetra na području mjerenja je 7 m/s. Brzina od 5,5 m/s je najčešća i na tom području pojavljivati će se najučestalije. Ona se naziva modalna vrijednost distribucije.

Zbog vrlo velikih razlika načina puhanja vjetra širom Zemlje ovisno o lokalnim uvjetima, Weibullova distribucija razlikovati će se po obliku i svojoj srednjoj vrijednosti. Ukoliko je parametar  $k = 2$  distribuciju nazivamo Rayleigheva distribucija. Proizvođači vjetroturbina obično izražavaju vrijednosti učinka koristeći Rayleighovu distribuciju. Jačina vjetra tradicionalno se iskazuje Beaufortovom ljestvicom.

Beaufortova oznaka, Bf	Opis vjetra	Djelovanje	Brzina na 10 m iznad tla		
			m/s	km/h	čv
0	Tišina	Dim se diže ravnu u vis, zastave i lišće s ne miču	0,0 - 0,4	0,0 - 1,4	0,0 - 0,9
1	Lahor	Čovjek ne osjeća, ali dim se više ne diže jednoliko, vjetrulja se ne pokreće	0,4 - 1,8	1,4 - 6,5	0,9 - 3,5
2	Povjetarac	Osjeća se na licu, lišće počinje treperiti i vjetrulja se pokreće	1,8 - 3,6	6,5 - 13	3,5 - 7
3	Slab vjetar	Lišće se neprestano njiše i šušti, lagana zastava se njiše	3,6 - 5,8	13 - 20,9	7 - 11
4	Umjereni vjetar	S tla se podiže prašina, suho lišće i papirići, zastava se razvija, njišu se manje grane	5,8 - 8,5	20,9 - 30,6	11 - 17
5	Umjereno jaki vjetar	Njišu se veće lisnate grane, a i mala stabla, ljudima je neugodno, stvaraju se mali valovi	8,5 - 11	30,6 - 39,6	17 - 22
6	Jaki vjetar	Zuji na predmetima, žice zvižde, njišu se velike grane, teško je nositi kišobran	11 - 14	39,6 - 50,4	22 - 28
7	Žestoki vjetar	Neprestano se njiše drveće, valovi se pjene, otežano je hodanje	14 - 17	50,4 - 61,2	28 - 34
8	Olujni vjetar	Njišu se debela drveća, lome se velike grane, onemogućeno je hodanje	17 - 21	61,2 - 75,6	34 - 41
9	Jaki olujni vjetar	Pomiču se manji predmeti, pomiču se cijepovi, nastaju štete na kućama	21 - 25	75,6 - 90	41 - 48
10	Orkanski vjetar	Obara se i čupa drveće sa korijenjem, nastaju veće štete na zgradama	25 - 29	90 - 104,4	48 - 56
11	Jaki orkanski vjetar	Velike štete na većem području, razorno djelovanje	29 - 34	104,4 - 122,4	56 - 65
12	Orkan	Teško pustošenje cijelog područja	43	154,8	65

1 m/s = 3,6 km/h = 1,944 čv (čvor)

*Tablica 2.2. Beaufortova ljestvica jačine vjetra*

## 2.2. Pozicioniranje turbine

### Efekt tunela

Prostori između dvije zgrade ili između planinskih prolaza predstavljaju suženi prostor kroz koji vjetar protječe brže. To se događa zbog toga što se zrak stlači i na taj način protječe brže kroz užu prolaz. Princip je isti kao kod strujanja fluida kroz užu presjek cijevi. Tako npr. brzina vjetra okoline može biti 6 m/s a u prostoru između planina ili zgrada dostizati i do 9 m/s. Da bi se dobro iskoristio efekt tunela, tunnel bi trebao biti "mekano" smješten u prostoru jer ukoliko su to oštri rubovi može se javiti mnogo turbulencija.

### Efekt ubrzanja ili efekt brda

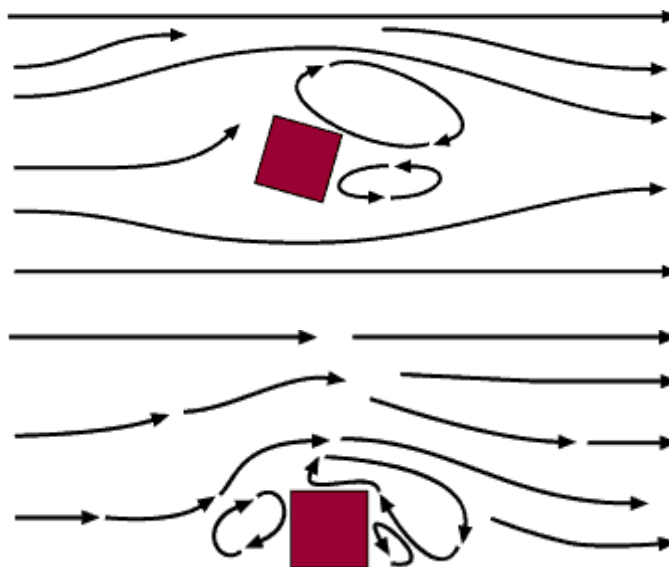
Uobičajeni način postavljanja vjetroturbina je postavljanje na vrh brda ili na uzvisine koje se izdižu. Prednost je što je moguće širi slobodan prostor u smjeru prevladavajućeg smjera vjetra u tom prostoru. Također, na uzvisinama su brzine vjetra veće nego u okolnom prostoru. To je zbog toga što vjetar biva stlačen s vjetrovite strane brda i u trenutku kada dođe do vrha može se ponovo širiti te se spušta dolje u područje niskog tlaka u zavjetrinu iza brda. Kada vjetar prođe kroz turbinu postaje turbulentan i ukoliko okolno područje nije jednoliko može doći do značajne količine turbulencije koja može negativno utjecati na iskorištavanje pogodnog položaja na uzvisini.

### Vjetar na moru

Kako je površina vode vrlo glatka (nije hrapava pa je trenje vrlo malo). S povećanjem brzine vjetra dio energije otpada na stvaranje valova pa se hrapavost povećava i tako uz nastanak novih valova dolazi do neravnomjerne hrapavosti kao u slučaju površine prekrivene s više ili manje snijega. Također se u proračun moraju uvrstiti otoci, svjetionici koji stvaraju otpor. Na otvorenom moru manja je turbulencija jer su razlike u temperaturama na otvorenom moru manje.

### Prepreke

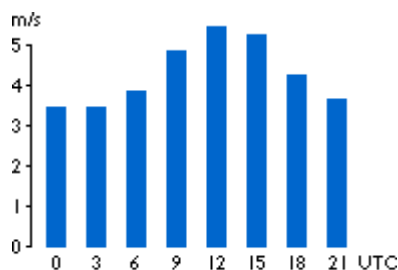
Prepreke na koje vjetar nastrujava na putu do vjetroturbine ometaju strujanje i time umanjuju vjetropotencijal. To su najčešće kuće, drveće i formacije stijena. Prepreke uzrokuju turbulenciju u blizini vjetroturbina.



Slika 2.11. Utjecaj prepreke na strujanja

### Dnevni i noćni temperaturni gradijent

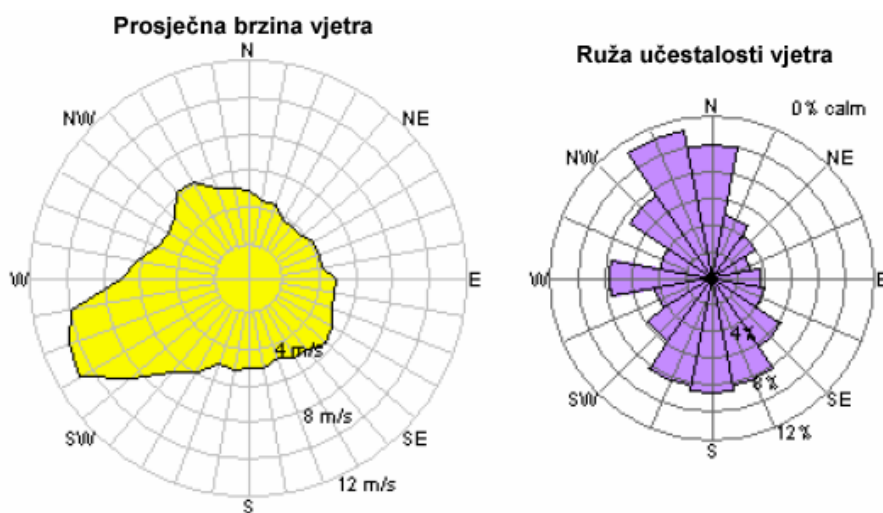
U većini lokacija na Svijetu danju je vjetrovitije nego noću. Ta varijacija je uzrokovana time što su temperaturne razlike veće danju nego noću. Vjetar je danju turbulentniji i češće mijenja smjer nego noću.



Slika 2.12. Brzine strujanja vjetra danju i noću

## 2.2. Mjerenje brzine vjetra i ruža vjetrova

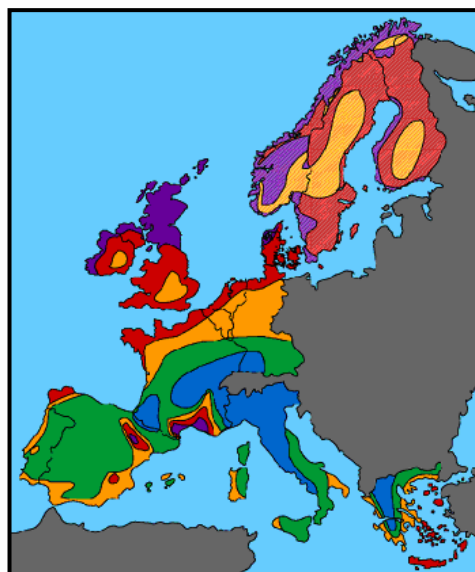
Mjerenje brzine vjetra vrši se pomoću anemometra. Anemometar koji se najčešće koristi sastoji se od tri poluloptaste čašice koje se nalaze na vrhu osovine te se okreću u smjeru vjetra. Broj okretaja registrira se elektronički. Uz anemometar se postavlja i mehanizam koji registrira smjer vjetra. Tako se dobivaju podatci o brzini i smjeru pomoću kojih se izrađuje ruža vjetrova određenog područja.



Slika 2.13. Ruža vjetrova

Ruža vjetrova opisuje brzine vjetra iz 12 različitih smjerova, a izgleda poput kompasa. Svaki od 12 smjerova obuhvaća 30° horizonta što je standard za europski atlas vjetrova. Karakteristike vjetrova na nekoj lokaciji mogu se razlikovati iz godine u godinu i do 10%, pa je preporučljivo mjerenja provesti kroz nekoliko godina.

Karta vjetrova daje prikaz vjetropotencijala za traženu lokaciju. Zbog vrlo zahtjevnog postupka mjerenja cijena izrade karte je vrlo velika. Ovakva karta obuhvaća i podatke o utjecaju terena na brzinu vjetra. Atlas Zapadne Europe izrađen je zbog višegodišnje tradicije mjerenja brzina vjetra na tom području te je prikazan na slici.

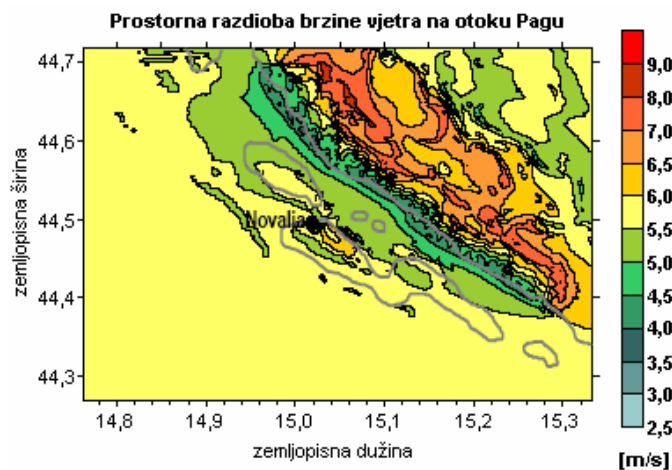


### Podatci o vjetru na 50m iznad zemlje

boja	zaklonjeni teren		otvoreni prostor		na morskoj obali		otvoreno more		brdoviti kraj	
	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
crvena	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
narandžasta	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
zelenkasta	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	1000-1200
plava	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
svijetloplava	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
crvena			>7.5							
narandžasta			5.5-7.5							
zelenkasta			<5.5							

Slika 2.14. Europska karta vjetrova

Izrada atlasa vjetrova za područje Hrvatske u svojim je počecima. Trenutno je dostupna karta vjetrova za područje otoka Paga, prikazana slikom.



Slika 2.15. Karta vjetrova za područje otoka Paga



### **3. Konstrukcijski oblici vjetroturbina**

Vjetroturbine spadaju u rotacijske strojeve na strujanje jer njihov rotor u kojem se vrši pretvorba energije vrši rotacijsko gibanje. Vjetroturbina je izložena slobodnoj struji zraka tj. kinetičkoj energiji vjetra iz okolnog vjetroenergetskog polja. Ta se energija u kolu turbine pretvara u okretni moment vratila.

Vjetroturbine su hladni strojevi, to znači da se u njima pretvara energija prirodnog fluida koji ima temperaturu okoline. Glavna karakteristika vjetra kao pogonskog fluida jest njegova obnovljivost. Nakon što zrak napusti sustav kojem je predao energiju vraća se u okolinu ne promijenjenih fizičkih i kemijskih svojstava. Preostala energija fluida na izlazu iz turbine dovoljna je da on napusti sustav.

#### **3.1. Podjela vjetroturbina**

Vjetroturbine možemo podijeliti prema položaju osi vrtnje. Uobičajene vjetroturbine imaju horizontalno postavljenu os vrtnje i zbog toga se nazivaju Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje ili VSHO (eng. HAWT). Manje poznate vjetroturbine imaju vertikalnu os vrtnje i nazivaju se Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje ili VSVO (eng. VAWT). Da bi se razjasnila razlika između ove dvije vrste vjetroturbina potrebno ih je detaljnije opisati.

##### **3.1.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje ili VSHO**

Rotor ovih turbina postavljen je horizontalno na vrhu stupa. Lopatice koje zahvaćaju vjetar moraju biti usmjerene u njega. Generator ovih turbina obično se postavlja na vrh stupa u trup zajedno s multiplikatorom ako je on potreban (ovisno o tipu električnog generatora). Multiplikatorom povećavamo brzinu vrtnje ukoliko je brzina vrtnje lopatica premala za proizvodnju električne energije.

Visina stupa vjetroturbine iznosi oko 1,5 do 2 promjera lopatica zbog toga da bi turbina mogla hvatati vjetrove veće brzine na većim visinama. Ove vjetroturbine moraju imati mogućnost zakretanja trupa zbog zahvaćanja vjetra iz različitih smjerova pa tako manje izvedbe imaju jednostavna krilca koja usmjeravaju vjetroturbinu u pravom smjeru dok veće imaju servo motor povezan s senzorom.

Postoje dvije izvedbe ovakvih vjetroturbina. Jedna izvedba je sa stupom iza lopatica dok je druga izvedba sa stupom postavljenim ispred njih. Izvedba sa stupom ispred lopatica ima prednost jer joj nije potreban mehanizam za zakretanje zbog toga što se trup sam postavlja prema vjetru. Za velike turbine ovo nije najbolje rješenje zbog toga što se gornji dio može zakrenuti mnogo puta u istom smjeru i stvoriti probleme s vođenjem kablova kroz stup (četkice ne dolaze u obzir u ovom slučaju jer se struje kreću i do 1000 A). Još važnija prednost je to što ovakve izvedbe podnose jače vjetrove zbog mogućnosti većeg savijanja lopatica bez opasnosti da će dodirnuti stup. Osim toga ovakva konstrukcija je uglavnom lakša. Glavna mana ove izvedbe jest to što lopatice prolaze kroz turbulenciju nastalu od tornja što pridonosi velikom opterećenju lopatica.



*Slika 3.1. Izvedba sa stupom ispred lopatica i izvedba sa stupom iza lopatica*

Izvedba sa stupom postavljenim iza lopatica najčešće se koristi. Prednost ovakve izvedbe je ta što izbjegava sjenu vjetra iza stupa. S druge strane postoji malo utjecaja od turbulencije oko stupa pa tako pri svakom prolasku lopatice ispred stupa dolazi do laganog pada snage. Glavna mane ove izvedbe je ta što rotor turbine mora biti izveden kruto i udaljeno od stupa, što povećava troškove izvedbe. Također uređaj za prilagođavanje smjeru vjetra je obavezan.

### **3.1.1.1. Broj lopatica**

Broj lopatica rotora kod horizontalnih vjetroturbina ima veliki utjecaj na njihove karakteristike. Uobičajena vjetroturbina s tri lopatice naziva se klasični Danski koncept. Prema tom konceptu ocjenjuju se ostali jer se pokazao kao najbolje rješenje. Te turbine koriste asinkrone generatore. Neparni broj lopatica u odnosu na parni pokazao se kao bolje rješenje zbog uravnoteženosti konstrukcije.

#### **Vjetroturbina s dvije lopatice**

Uštedom na jednoj lopatici dobivamo potrebu za većom brzinom vrtnje da bi dobili jednaku količinu energije kao vjetroturbina s tri lopatice. Veće brzine povećavaju razinu buke. Osim toga ovakva izvedba zahtjeva složenije učvršćenje lopatica za trup jer im se mora dopustiti mali kut zakretanja u vertikalnoj osi da bi se izbjegla velika naprezanja pri prolasku lopatice ispred stupa.

#### **Vjetroturbina s jednom lopaticom**

Unatoč još većoj uštedi zbog smanjenja broja lopatica ovakva izvedba nije se pokazala dobrom. Javlja se još veća buka, i potreba za protu utegom na suprotnoj strani lopatice.

#### **Vjetroturbina s više lopatica “Američka” vjetroturbina**

Ovakve se vjetroturbine koriste na farmama za pogon pumpi za vodu. Brzina vrtnje je mala. Imaju velik moment pokretanja ali malu ukupnu učinkovitost. Izvedba je jednostavna i robusna.



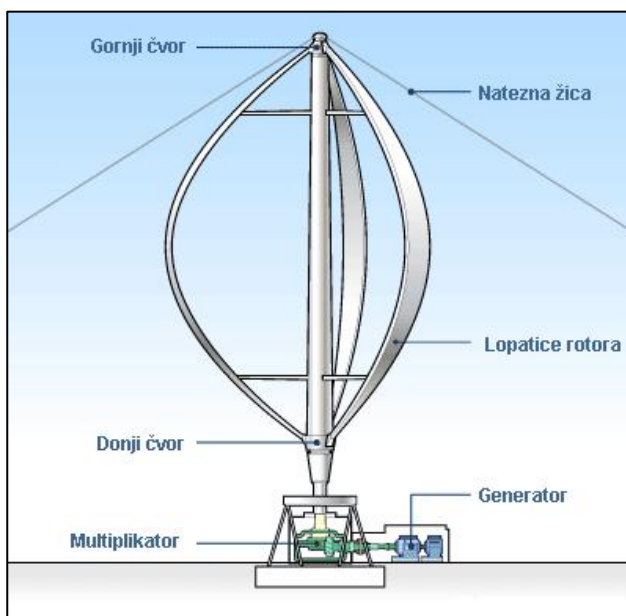
*Slika 3.2. "Američka" vjetroturbina*

### **3.1.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje ili VSVO**

Položaj vratila ovakve izvedbe vjetroturbine je vertikalni, zbog toga se generator nalazi u podnožju i time je toliko manje opterećen. Prednost u odnosu na horizontalne vjetroturbine je to što se ove vjetroturbine ne moraju usmjeravati u vjetar. U posljednje vrijeme pojavilo se mnogo izvedbi ovakvih vjetroturbina.

#### **3.1.2.1. Darrieusova vjetroturbina**

Osnovna izvedba ove vjetroturbine pojavila se 1927. godine. Francuski inženjer zrakoplovstva Georges Jean Marie Darrieus patentirao je svoju vertikalnu vjetroturbinu prema kojoj su kasnije nastale druge izvedbe.

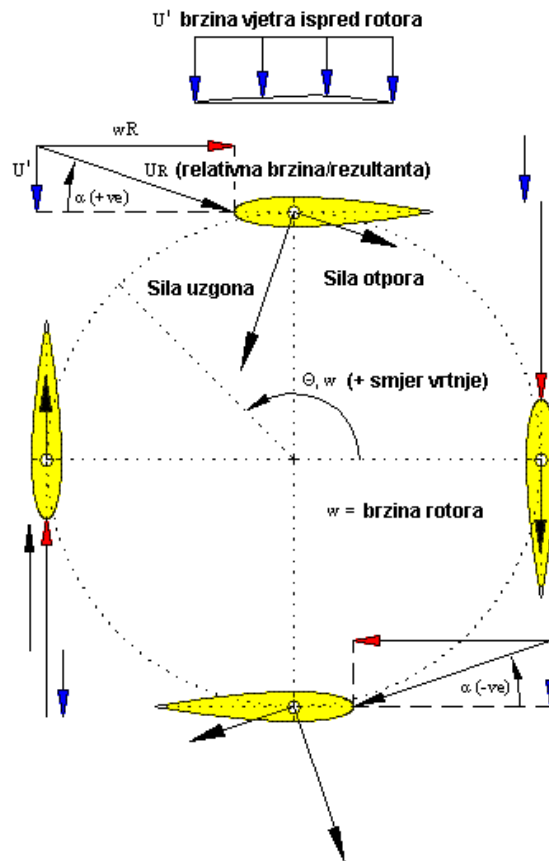


*Slika 3.3. Darrieusova vjetroturbina*

Oko rotirajućeg vratila raspoređene su lopatice aerodinamičnog profila. Ovakva izvedba jednako je učinkovita, neovisno o smjeru puhanja vjetra, u odnosu na konvencionalne vjetroturbine. Brzina vrtnje ove izvedbe je uglavnom puno veća od brzine vjetra.

Princip rada Darrieusove turbine je slijedeći. Pretpostavlja se da vjetar koji nailazi na lopaticu puše ravno. Lopatice se vrte mnogo brže u odnosu na brzinu vjetra pa je tako omjer brzine vrha lopatice  $> 3$ . Slika 3.4. prikazuje vektor brzine lopatice u različitim položajima u odnosu

na vjetar. S tako visokim omjerom lopatice će “rezati” vjetar s malim napadnim kutom. Rezultirajuća sila uzgona pokreće rotor, dok je sila otpora uvijek suprotnog smjera. Sila uzgona pada na nulu s lijeve strane (na  $0^\circ$ ) a s desne se (na  $180^\circ$ ) lopatica pokreće u smjeru vjetra pa je u toj poziciji moment je negativan. Kada je lopatica točno ispred (na  $90^\circ$ ) i odzada (na  $270^\circ$ ) komponenta uzgona je mnogo veća od komponente otpora pa se proizvodi pozitivan moment. Ukupni moment po obrtaju biti će pozitivan pa će se tako rotor vrtjeti u pravom smjeru.

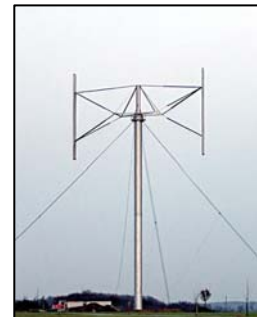


Slika 3.4. Brzine i sile na presjeku lopatica

Ovakvoj izvedbi vjetroturbine potrebna je pomoć pri pokretanju jer moraju postići određenu brzinu vrtnje prije nego što se počnu same vrtjeti. Pri malim brzinama Darrieusova turbina ima vrlo mali moment pa se vrlo lako zaustavlja zbog trenja u sustavu.

### H-tip

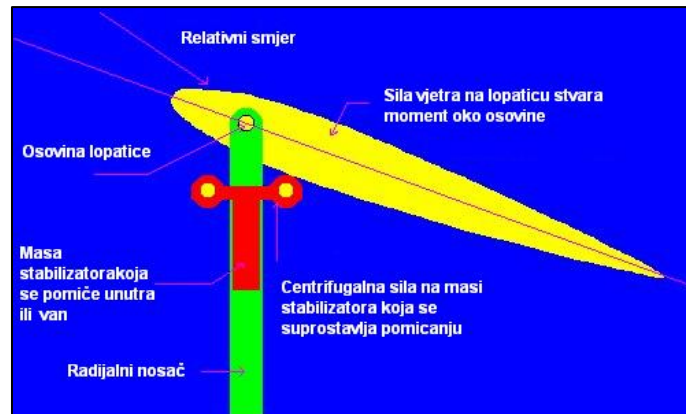
Jedan od poznatih izvedbi je H-tip kod kojeg su lopatice postavljene paralelno s obzirom na os vrtnje. U odnosu na uobičajenu Darrieus turbinu ovo je jednostavnija izvedba no problem je u tome što je masa lopaticama pomaknuta u odnosu na simetralu tornja. Iz tog razloga lopatice moraju biti čvršće.



Slika 3.5. H-tip turbine

### Turbine s mogućnošću zakretanja lopatica

Ova izvedba vjetroturbine ista je kao H-tip a razlika je u tome što lopatice imaju mogućnost zakretanja oko svoje osi. To omogućuje lopaticama postavljanje u položaj tako da uvijek imaju neki kut napada vjetra. Glavna karakteristika ovog tipa turbine sa tri ili četiri lopatice je ta što je moment približno konstantan. Zbog sustava zakretanja dobiva se skoro maksimalni mogući moment što pridonosi povećanju korisnosti ovakve vjetroturbine, a to znači da dobivamo više energije. Pozitivna karakteristika jest mogućnost samopokretanja okretanjem lopatica u optimalan položaj da bi se generirala dovoljno velika sila uzgona za pokretanje. S druge strane, mehanizam za zakretanje je kompleksan i zahtjeva neku vrstu senzora za određivanje smjera vjetra.



Slika 3.6. Shema sustava za okretanje lopatica

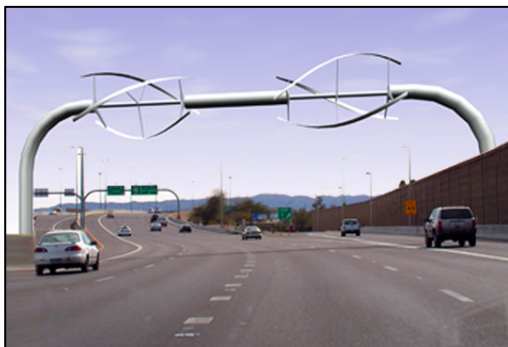
### Tip sa spiralnim lopaticama

Lopatice Darrieusove turbine mogu tvoriti spiralu npr. tri lopatice zakrenute za  $60^\circ$ . Vjetar može imati dobar napadni kut na lopaticu s obje strane turbine neovisno o položaju u kojem se lopatica nalazi. Razlog tome je upravo spiralni oblik lopatica. Moment je tako ujednačen tijekom cijelog okreta i nema pulsacija, a kako se aksijalne sile poništavaju opterećenje na ležajeve je manje u odnosu na ostale tipove Darrieusovih turbina. Ovakav oblik također smanjuje otpor rotaciji. Još jedna povoljna karakteristika ovog oblika turbine jest mogućnost hvatanja turbulentnih struja kakve se pojavljuju iznad krovova objekata. Osim toga problem samopokretanja je otklonjen.



Slika 3.7. Spiralna vjetroturbina

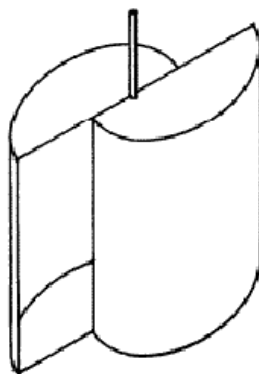
Osim vertikalnih izvedbi postoje i horizontalne izvedbe Darrieusove vjetroturbine što uvelike olakšava i proširuje njihov spektar primjene. Prednost je u tome što su ležajevi bolje smješteni na konstrukciji i time su manje aksijalno opterećeni. Ovakvom izvedbom konstrukcija se smješta na određenu visinu na kojoj hvata jednoliko raspoređenu brzinu vjetra pa je time izbjegnut problem malih brzina na dijelu turbine koji se nalazi pri tlu. Negativan aspekt ove izvedbe jest nemogućnost hvatanja vjetra iz svih smjerova (kao i kod VSHO) pa se spektar njihove primjene smanjuje.



*Slika 3.8. Horizontalne izvedbe Darrieusovih vjetroturbina*

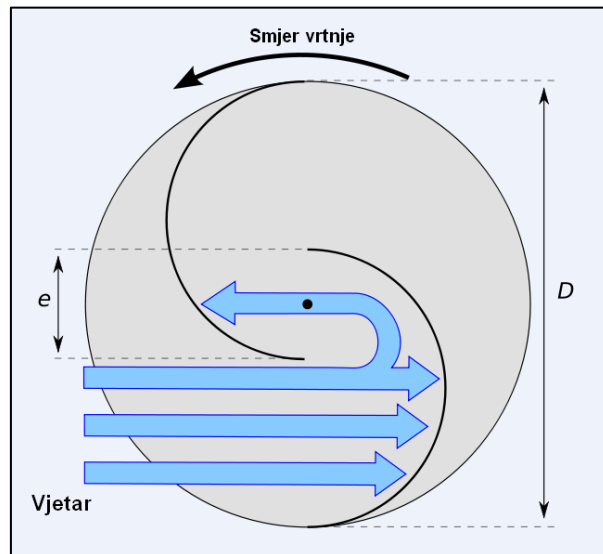
### 3.1.2.2. Savoniusova vjetroturbina

Ova vjetroturbina zamisao je Finskog inženjera Sigurda J. Savoniusa. Ovo je prva izvedba vertikalne vjetroturbine, a nastala je 1922. godine. Ponekad može imati i tri lopatice.



*Slika 3.9. Savoniusova vjetroturbina*

Ovakav tip vjetroturbine radi na principu potisne sile. Gledajući presjek, turbina ima oblik slova S. Zbog zaobljenja lopatica ima manji potisak kada se giba protiv vjetra s ispupčenim dijelom nego kada se giba s vjetrom uleknutim dijelom (slika 3.10.). Na taj način potisak je uvijek jači u jednom smjeru i dolazi do rotacije. Zbog ovakvog principa rada ove vjetroturbine daju puno manje energije nego uzgonske turbine iste veličine.



*Slika 3.10. Princip rada Savoniusove vjetroturbine*

Ovakve vjetroturbine vrlo su jednostavno izvedene pa se koriste u slučajevima kada su cijena i pouzdanost bitniji od učinkovitosti, npr. anemometar. Još jedna upotreba ovog principa pojavljuje se na vrlo poznatom Flettner ventilatoru. On se koristi na krovovima kuća ili autobusa i služi ventilaciji prostora, pogoni ga snaga vjetra. Također se ponekad mogu uočiti reklamne oznake u obliku ove vjetroturbine, cilj im je rotacija reklamnog znaka kojom se privlači pažnja.

Postoji i izvedba ovakve turbine kod koje su lopatice spiralno zakrenute po dužini pa se na taj način dobiva ujednačeni moment na vratilu.



*Slika 3.11. Spiralna Savoniusova vjetroturbina*



## 4. Značajke rada vjetroturbina

### 4.1. Stupanj učinkovitosti vjetroturbine

Teoretski stupanj učinkovitosti pretvorbe energije vjetra pokazuje kolika je maksimalna energija koju možemo dobiti pomoću vjetroturbine od vjetra u slobodnoj struji. Teorija koja definira maksimalni stupanj učinkovitosti vjetroturbine naziva se Betzov zakon prema Njemačkom fizičaru Albertu Betzu (1885.-1968.) pioniru u istraživanju tehnike vjetroturbina. Betzov zakon pokazuje maksimalnu energiju koja se može dobiti od fluida koji struji određenom brzinom kroz infinitezimalno tanki rotor.

Da bi se izračunao maksimalni teoretski stupanj djelovanja tog rotora on se predstavlja kao disk kroz koji prolazi fluid i predaje mu svoju energiju. Prolaskom kroz disk vjetar gubi na brzini. Može se postaviti jednačina:

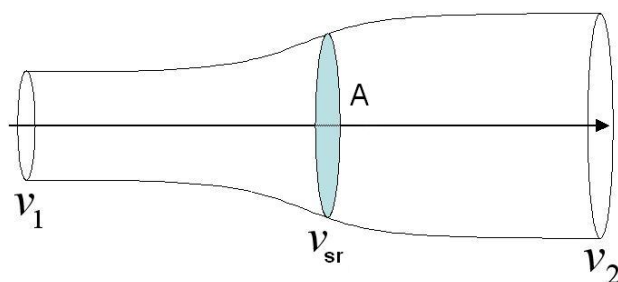
$$v_{sr} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (1)$$

Gdje je:

$v_{sr}$  - srednja brzina

$v_1$  - brzina vjetra ispred rotora

$v_2$  - brzina usporenog vjetra iza rotora



Slika 4.1. Shematski prikaz strujanja fluida kroz disk rotora

Maseni protok je:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_{sr} = \frac{\rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2)}{2} \quad (2)$$

$\dot{m}$  - protok mase u vremenu

$A$  - površina diska

$\rho$  - gustoća fluida



Razlikom kinetičke energije prije ulaska fluida u rotor i nakon njegovog izlaska dobiva se snaga vjetroturbine:

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (3)$$

$\dot{E}$  - snaga

Ako uvrstimo maseni protok:

$$\dot{E} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot \left( 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 + \left( \frac{v_2}{v_1} \right) - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right) \quad (4)$$

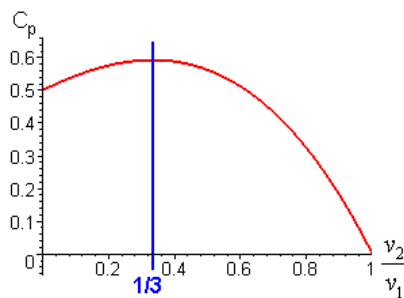
Maksimum ove funkcije dobiva se za  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$  za danu brzinu vjetra  $v_1$  i površinu  $A$ . Kada se vrijednost uvrsti u jednadžbu (4) dobiva se:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (5)$$

Od kud dobivamo koeficijent korisnosti:

$$C_{p,\max} = \frac{16}{27} = 0,593 \text{ ili } 59,3\%$$

$$C_p = \frac{P}{P_{\max}}$$



Slika 4.2. Koeficijent  $C_p$  s obzirom na  $\frac{v_2}{v_1}$

Stvarni stupanj korisnosti uvelike ovisi o konstrukciji vjetroturbina te aerodinamičnim značajkama njihovih lopatica. Vjetroturbine a u današnje vrijeme mogu postići  $C_p$  od 0,4 do 0,5 što je 70 do 80% od teoretske granice. Gubitci nastaju u ležajevima, prijenosu, generatoru itd. Horizontalne vjetroturbine imaju veći stupanj iskoristivosti od vertikalnih vjetroturbina, no moramo uzeti u obzir činjenicu da vertikalna vjetroturbina nema potrebu zakretati se da bi se usmjerila u vjetar pa tako pri vrlo turbulentnim strujama daje više energije.

## 4.2. Koeficijent brzohodnosti

Koeficijent brzohodnosti  $\lambda$  je omjer brzine vrtnje vrha lopatice i brzine vjetra. Pa je tako:

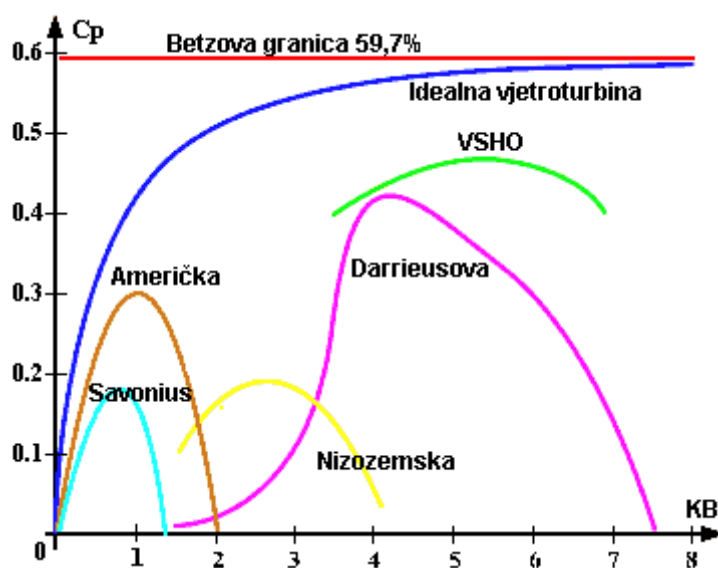
$$\lambda = \frac{r\omega}{v}$$

Gdje je:

$r$  - polumjer kružnice koju čini vrh lopatice pri rotaciji

$\omega$  - brzina vrtnje vrha lopatice

$v$  - brzina vjetra



Slika 4.3. Promjena koeficijenta korisnosti s promjenom koeficijenta brzohodnosti

Unatoč konstrukcijama koje se sve više približavaju gornjoj granici iskoristivosti, horizontalne vjetroturbine se suočavaju s vrtlozima koji nastaju na vrhovima i na čeonj strani lopatica pa je time dobivena energija umanjena, između ostalog, i za te gubitke. Kod vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje nema pojave vrtloga na vrhovima lopatica.

## 5. Proizvodnja električne energije

Vjetroelektrana je postrojenje koje pretvara kinetičku energiju vjetra u električnu ili mehaničku energiju. Vjetroelektranu čini jedna ili više vjetroturbina raspoređenih na nekom prostoru, a da su pritom izložene istom vjetru i zajedno spojene na mrežu. Prema instaliranoj snazi dijele se na male vjetroelektrane i crpne stanice snage do nekoliko desetaka kW te velike vjetroelektrane s vjetroturbinama pojedinačne snage do 3,5 MW.

Male vjetroelektrane, tj. energija koju proizvode, mogu se koristiti na nekoliko načina:

- Kada je potrošač u nemogućnosti spojiti se na električnu mrežu vjetroturbina može biti samostalan izvor energije. Ukoliko se proizvede višak energije ona se može pohraniti u akumulator za naknadno korištenje. Kako je vjetar kao pojava vrlo nepredvidive prirode može se dogoditi da na danoj lokaciji u određenom vremenskom periodu nema vjetra. Iz tog razloga kod ovakvog načina instalacije poželjno je osigurati rezervni sustav napajanja. Rezervni sustav može objediniti nekoliko izvora energije kao npr. solarne kolektore i diesel agregat. Pri korištenju prednost bi se uvijek trebala dati obnovljivim izvorima energije.
- Drugi način spajanja jest spajanje vjetroturbine na električnu mrežu pa se, ukoliko nema vjetra, koristi struja iz mreže. Ukoliko se troši manje energije no što vjetroturbina proizvede, višak se predaje mreži.
- I posljednji način iskorištavanja energije vjetra jest pogon vodnih crpki, punjenje akumulatora na brodovima i sl.

### 5.1. Generatori električne energije prikladni za rad vjetroturbina

Uloga električnog generatora u sustavu vjetroturbine jest pretvorba mehaničke energije u električnu. Nedostatak vjetroturbine kao pogona jest fluktuacija okretnog momenta. Također zahtijevaju hlađenje koje se vrši zrakom ili vodom.

Generatori koji se koriste kod vjetroturbina mogu biti sinkroni i asinkroni:

#### Sinkroni generator

Sinkroni generator spada u strojeve izmjenične struje. Njegova brzina čvrsto je povezana s frekvencijom napona i brojem pari polova što se može vidjeti iz jednadžbe:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad \text{ili} \quad n_s = \frac{f}{p}$$

Sinkroni generatori uglavnom se primjenjuju kada se znaju uvjeti rada pogona tj. kada je brzina vrtnje vjetroelektrane stalna (to se postiže ugradnjom sustava za zakretanje lopatica kod VSHO). Sinkronim generatorima potreban je uzbudni sustav i regulator brzine kojim će se održavati napon i frekvencija. Oni imaju veći stupanj djelovanja i pouzdani su no pri uvjetima kada dolazi do poremećaja brzine vrtnje, zbog fluktuacije brzine vjetra ili poremećaja u mreži, teško zadržavaju sinkronizam.

$p$	$n_s$ za 50 Hz $\text{min}^{-1}$
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600
6	500
8	375

Tablica 5.1. Sinkrone brzine vrtnje za razne brojeve pari polova

Za primjenu kod vjetroturbina koje nemaju konstantnu brzinu vrtnje potrebno je osigurati statički pretvarač frekvencije. Time se izbjegavaju problemi nestabilnosti napona. Ovo je inicijalno skuplja varijanta ali ako je cijena isporučene energije visoka dugoročno dobiva na isplativosti.

Sinkroni generatori prikladni su za otočni način rada uz regulatore napona i frekvencije. Dodatna prednost ovih generatora jest sposobnost proizvodnje jalove snage što je poželjno ako su priključeni na naponski slabu mrežu.

### Asinkroni generatori

Također spadaju u strojeve izmjenične struje no njihova je brzina vrtnje različita od sinkrone brzine i ovisna je o opterećenju.

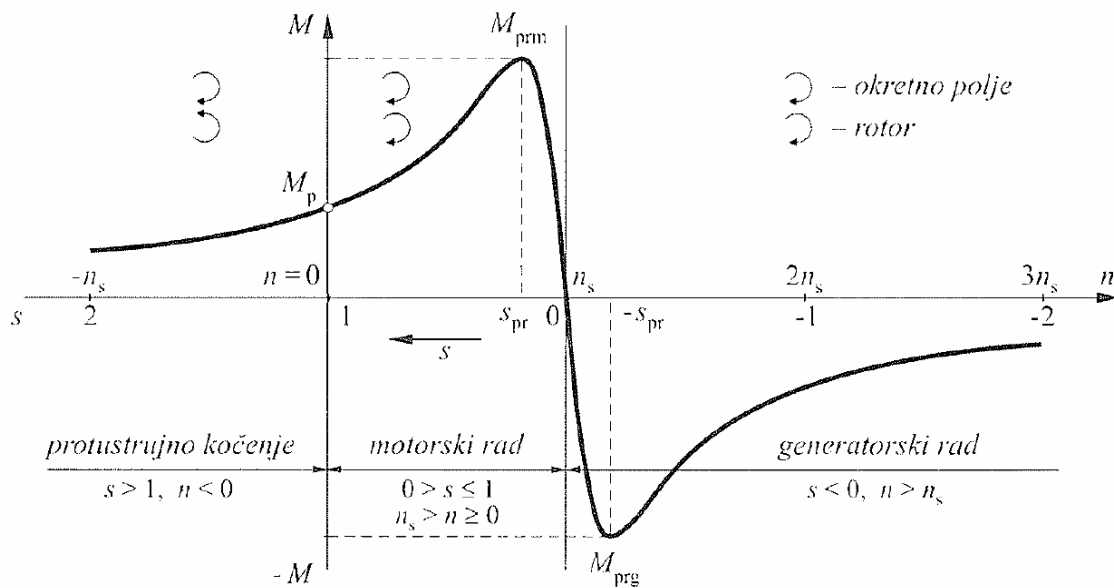
Kod motornog rada ovih strojeva priključivanjem na izmjenični simetrični trofazni izvor kroz namot statora poteku struje i stvore rotirajuće magnetsko polje koje rotira sinkronom brzinom  $n_s$  i pri rotaciji presijeca vodiče rotorskog i statorskog namota te se u njima inducira napon. Rotor se okreće u smjeru vrtnje magnetskog polja. Brzina vrtnje rotora uvijek je manja od sinkrone brzine i ovisi o opterećenju motora. Različitost brzina vrtnje rotora i magnetskog polja izražava se klizanjem  $s$ . Ako je brzina vrtnje rotora  $n$ , klizanje je:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Pomoću ovog izraza može se doći do brzine vrtnje motora ako je poznata frekvencija mreže, broj polova motora te klizanje:

$$n = n_s(1 - s) = \frac{f}{p}(1 - s)$$

U generatorskom načinu rada klizanje mora biti  $s < 0$  a brzina vrtnje rotora  $n > n_s$ . Moment je negativan jer moramo dovoditi rad da bi dobili električnu struju.



Slika 5.1. Karakteristika momenta asinkronog stroja za jedan smjer vrtnje polja

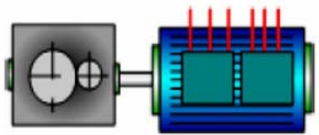
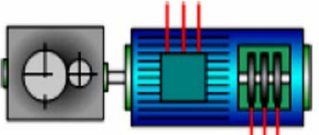
Ovi generatori obično se koriste za spajanje vjetroelektrane na krutu mrežu. Osnovna prednost odražava se u njihovoj jednostavnoj i jeftinoj konstrukciji, no s druge strane moraju imati kompenzacijski uređaj (uklopive kondenzatorske baterije) i priključni uređaj koji služi za sinkronizaciju s mrežom. U usporedbi s sinkronim generatorom asinkroni je u prednosti kod priključenja na mrežu zbog jednostavnijeg sustava upravljanja. Osim toga on je robusniji i znatno jeftiniji, a uvjeti održivosti sinkronizma mnogo su fleksibilniji.

Za potrebe vjetroturbina koje imaju promjenjivu brzinu vrtnje rotora potrebno je dodati diodni ispravljač u mosnom spoju za regulaciju djelatnog otpora rotora i promjenu brzina/moment karakteristike asinkronog motora.

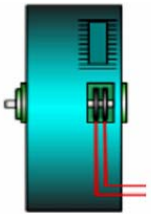
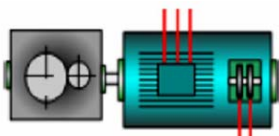
Ovdje napon i frekvencija mreže određuju napon i frekvenciju asinkronog generatora. Maksimalna radna snaga ograničena je najvećom dopuštenom strujom u trajnom radu, a ovisi o dovedenoj mehaničkoj snazi tj. o brzini vrtnje generatora.

Glavni nedostatak je nemogućnost rada bez napona mreže pa je potrebno koristiti samouzбудu u obliku kondenzatora. Nije mu potrebna sinkronizacija niti uzbudni sustav, ali treba imati uređaj za ograničenje brzine vrtnje da ne bi došlo do pobjega, tj. do postizanja prevelikih nadsinkronih brzina pri naglom rasterećenju. Lako ih je održavati jer zahtijevaju samo povremenu zamjenu ležajeva.

### 5.1.2. Usporedba sinkronog i asinkronog generatora

Generator	Prednosti	Nedostatci
<p>Asinkroni kavezni jedno ili dvostrzinski generator (<math>2p=4</math> ili 6)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jednostavnost izrade</li> <li>- jednostavno održavanje</li> <li>- prigušenje pulsacija momenta turbine</li> <li>- niska nabavna cijena</li> <li>- izravni spoj na mrežu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- potrebna jalova energija</li> <li>- potreban soft start uređaj za prvo priključenje na mrežu</li> <li>- primjenjivo samo za fiksne brzine turbine</li> <li>- upotreba multiplikatora</li> <li>- neupotrebljivo za mnogo polova (<math>&gt;20</math>)</li> </ul>
<p>Asinkroni klizno-kolutni dvostrano hranjeni generator</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bitno smanjena snaga i cijena pretvarača</li> <li>- mogućnost regulacije brzine vrtnje (tipično <math>\pm 20 - 25\%</math>) za optimalno korištenje energije</li> <li>- jalova snaga za magnetiziranje stroja iz pretvarača</li> <li>- moguć podsinkroni i nadsinkroni rad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- klizni koluti i četkice, trošenje, održavanje</li> <li>- složeno upravljanje agregatom</li> <li>- izravni spoj na mrežu je otežan</li> </ul>
<p>Sinkroni generator s uzбудnom strujom na rotoru</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jednostavno upravljanje jalovom snagom</li> <li>- široko područje brzina vrtnje</li> <li>- jednostavan za upravljanje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- potreban pretvarač za ukupnu snagu</li> <li>- potreban uzбудni sustav</li> <li>- klizni koluti i četkice, trošenje i održavanje</li> </ul>

Tablica 5.2. Usporedba generatora

Generator	Prednosti	Nedostatci
<p>Direktan pogon</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jednostavnija izvedba cijelog vjetroagregata jer nema multiplikatora koji se smatra kompliciranim za izradu i održavanje</li> <li>- veća korisnost agregata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- velike dimenzije i masa, problem izrade, transporta i montaže generatora</li> </ul>
<p>Pogon s multiplikatorom</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- male dimenzije i masa generatora</li> <li>- standardni generator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- visoka cijena, gubitci (2-3)% i problemi održavanja multiplikatora</li> </ul>

Tablica 5.3. Prednosti i nedostatci direktnog pogona u odnosu na pogon s multiplikatorom

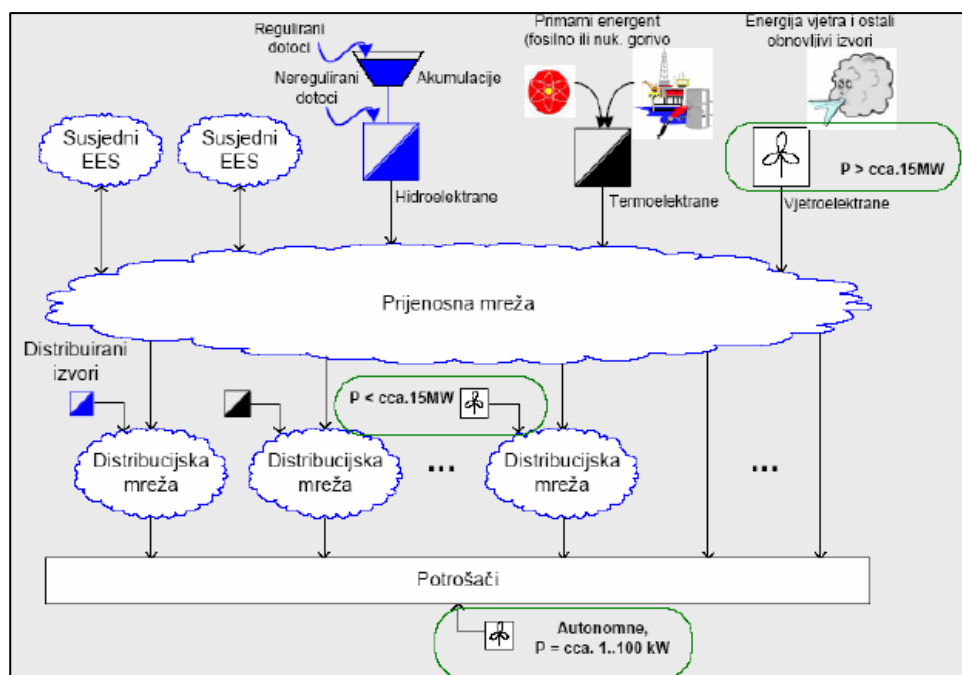
## 5.2. Spajanje vjetroelektrane u elektroenergetski sustav

Da bi se vjetroelektrana spojila na mrežu moraju se zadovoljiti osnovni tehnički kriteriji pa je tako potrebno:

- Poznavati najveću dozvoljenu snagu koju vjetroelektrana smije injektirati u mrežu (to određuje HEP s obzirom na mogućnosti elektroenergetskog sustava (EES) Hrvatske)
- Odrediti raspon frekvencije sustava
- Osigurati regulaciju napona
- Zadržati stabilnost u stanju kvara, stabilnost kuta i napona
- Osigurati kvalitetu isporučene električne energije
  - Emisija flikera (padovi napona koji uzrokuju treptaj na žaruljama)
  - Fluktuacije napona
  - Omjer radne i jalove snage
  - Kratki spoj

Testiranje:

- Pokretanje
- Zaustavljanje u uvjetima velike brzine vjetra
- Vladanje u uvjetima promjene frekvencije sustava
- Vladanje u uvjetima promjene napona sustava
- Vladanje u uvjetima njihanja u sustavu
- Provjera kvalitete



Slika 5.2. Priključenje na mrežu

## **6. Novi konstrukcijski oblici vertikalnih vjetroturbina**

Kako je u današnje vrijeme energija vjetra postala vrlo privlačna, a samim time i potencijalno unosna tema, na tržištu se pojavilo mnoštvo novih proizvoda koji pretvaraju energiju vjetra u električnu energiju. Osim razvoja uobičajenih horizontalnih vjetroturbina pojavio se i veliki interes za razvoj vertikalnih vjetroturbina. Pretraživanjem internetskih stranica vrlo se lako mogu pronaći novi inovativni konstrukcijski oblici takvih vjetroturbina no njihova učinkovitost i ekonomska isplativost je upitna.

U početku ovog rada navedeni su osnovni konstrukcijski oblici vertikalnih vjetroturbina a to su Darrieusova i Savoniusova vjetroturbina. Ako se promotre svi konstrukcijski oblici koji će se opisati u ovom dijelu rada lako se može zaključiti da se svi baziraju na ta dva osnovna oblika.

Podatci koji će biti navedeni u ovom poglavlju uzimaju se s velikom rezervom jer se na tržištu vjetroturbina, zbog borbe s konkurencijom, mnogo puta navode neistiniti podatci testiranja. Zbog nemogućnosti vlastitog testiranja svih konstrukcijskih oblika neminovno je osloniti se na dane podatke. Navedene konstrukcije odabrane su prema teoretski pouzdanim kriterijima i mogu se svrstati u oblike kojima se zaista može dobiti određena količina električne energije, no pitanje njihove iskoristivosti moralo bi se provjeriti u laboratorijskim uvjetima mjerenjem.

### **6.1. Konstrukcijski oblici vjetroturbina na tržištu i njihova usporedba**

#### **6.1.1. Helix Wind**

Helix Wind vjetroturbina konstruirana je i testirana u San Diegu i Las Vegasu. Podatci o performansama dobiveni su mjerenjima instaliranih vjetroturbina i testiranjem u zračnom tunelu. Ova vjetroturbina daje ujednačeni moment u velikom rasponu brzine vjetra i u teškim uvjetima rada. Nije potrebno zaustavljanje pri jakom vjetru, instalacija je jednostavna i modularna. Pogodna je za korištenje u urbanim sredinama. Zahvaća vjetar iz svih smjerova i pogodna je za turbulentno strujanje vjetra. Postoji mogućnost modularne nadogradnje pa je moguće povećati snagu dodavanjem spirala u visinu.



*Slika 6.1. Helix Wind vjetroturbina*

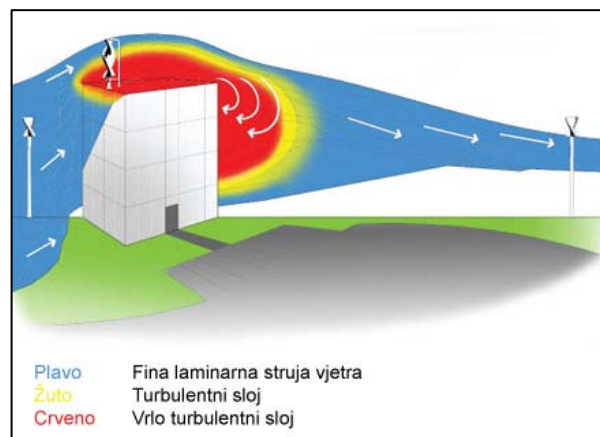




Slika 6.2. Modularna nadogradnja Helix vjetroturbine

Specifikacije:

- Određena snaga - 2.5 kW
- Vršna snaga – 2.81 kW
- Dimenzije rotora - 1.21m x 2.65m
- Radni prostor - 3.22 m<sup>2</sup>
- Konstrukcija rotora – Ultra čvrsta aluminijska legura
- Tip – Savoniusova helikoidalna vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje (VSVO)
- Generator - 2.5 kW visoko učinkoviti generator s permanentnim magnetom
- Brzina vjetra pri kojoj započinje vrtnja - 3.6m/s
- Kočenje – kočenje nije potrebno za normalan način rada. Ručno zaustavljanje za potrebe održavanja.
- Spajanje na mrežu - 110VAC - 240VAC, 50-60Hz inverter vezan na mrežu
- Bez mreže – mogućnost napajanja baterije
- Masa – 135 kg
- Radni vijek - 30 godina
- Stup – preporučljiva je visina od 4.5m do 6.0m ovisno o okolnim preprekama
- Cijena - oko 70 000 kuna
- Konstrukcija radi vrlo tiho i producira zvuk niži od 5 decibela iznad okolinskih zvukova
- Sigurna je za ptice i šišmiše
- Estetski zadovoljava



Slika 6.3. Turbulentno strujanje vjetra kada nailazi na prepreku

### 6.1.2. Quiet revolution

Britanska tvrtka sa sjedištem u Pembroke Dock-u u južnom Wales-u bavi se proizvodnjom vertikalnih vjetroturbina spiralnog Darrieus tipa.



*Slika 6.4. Quiet revolution turbina*

Specifikacije:

- Dimenzije - 5m visina x 3.1m promjer
- Generator - istosmjerni, generator s permanentnim magnetom
- Power control - kontrolom izlazne snage konstantno se optimizira izlazna snaga za sva područja postavljanja i za sve brzine vjetra
- Radno područje - Max brzina vjetra: 16m/s; Min brzina vjetra: 4.5m/s
- Životni vijek - 25 godina
- Materijal – lopatice i trostrani držači su izrađene od karbonskih vlakana i epoksidne smole
- Kočnice – Kočenje uslijed prekoračenja brzine se vrši pri brzini vjetra od 14m/s, automatsko gašenje pri velikim brzinama vjetra (iznad 16m/s)
- Praćenje i pohrana podataka preko PC-a – prosječna brzina vjetra i dobivena količina el. energije
- Cijena turbine oko 200 000 kuna
- Cijena stupa oko 25000 Ovisno o visini i obradi
- Cijena upravljanja oko 37000 za jednu turbinu, smanjuje se za spajanje više turbina u niz

## 6.2. Usporedba navedenih vjetroturbina

Podatci u tablici uzeti su iz dijagrama koji se nalaze na web stranicama proizvođača i prikazuju snagu pri brzini vjetra od 7 m/s.

Naziv:	Helix wind	Quiet revolution
Snaga u W (7 m/s)	270	1000
Dimenzije m	2,64 x 1,2	5 x 3,1

*Tablica 6.1. Usporedba snage i dimenzija vjetroturbina*

Slijedeća tablica prikazuje vrijednosti za Quiet revolution vjetroturbinu manjih dimenzija koje su dobivene preračunavanjem vrijednosti snage u odnosu na površinu vjetroturbine slijedeći raspodjelu snage istih dijagrama. Ovdje bi se moglo zaključiti kako vjetroturbina proizvođača Helix wind daje više snage za istu površinu vjetroturbine no taj se podatak mora moći dodatno obrazložiti.

Naziv:	Helix wind	Quiet revolution
Snaga u W (7 m/s)	270	230
Dimenzije m	2,64 x 1,2	2,64 x 1,2

*Tablica 6.2. Usporedba snage i dimenzija vjetroturbina istih dimenzija*

U dijagramu koji prikazuje odnos stupnja učinkovitosti i koeficijenta brzohodnosti (slika 4.3.) može se uočiti da Savonius vjetroturbina ima dvostruko manji stupanj učinkovitosti te zbog toga, teoretski, nije moguće da daje više snage od Darrieusove vjetroturbine istih dimenzija no mora se uzeti u obzir i činjenica da Helix vjetroturbina ima izmijenjen oblik lopatica u odnosu na klasičan Savonius oblik što pridonosi boljoj iskoristivosti. Točan odgovor na vjerodostojnost ovih podataka ne može se dati bez ispitivanja. U nemogućnosti za dobivanjem točnijih podataka uzima se da su ovi podatci točni.

### 6.3. Idejni projekti vertikalnih vjetroturbina

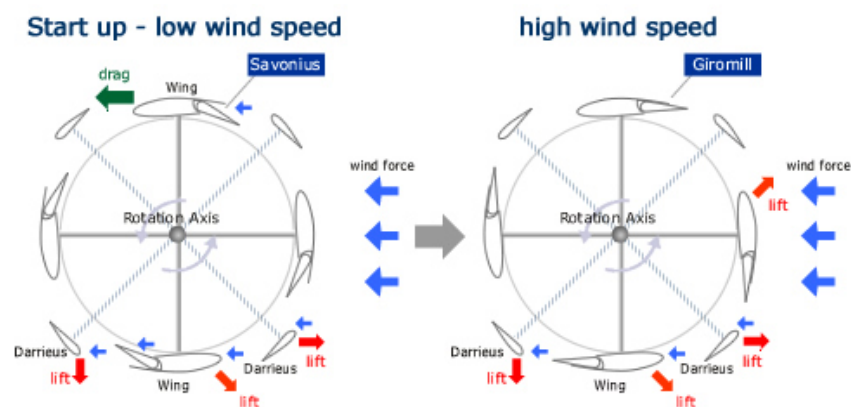
#### 6.3.1. Wing

Japanska tvrtka Seabell International, Ltd. utemeljena je 2004. godine i bavi se proizvodnjom inovativnih tehničkih konstrukcija za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora za urbanu sredinu.



Slika 6.5. Wing vjetroturbina s solarnim kolektorima

Ovakva konstrukcija kombinira oba osnovna konstrukcijska oblika i na taj način iskorištava najbolje od svakog. Kako je problem Darrieusove vjetroturbine samopokretanje taj problem rješava se mijenjanjem oblika lopatica tako da poprime zaobljen oblik Savoniusovog tipa i na principu potisne sile okreću turbinu. Takav oblik postiže se dodavanjem pomičnog krilca konstrukciji. Kada vjetroturbina postigne dovoljnu brzinu lopatice se izravnavaju i tvore oblik lopatica Darrieusovog tipa te se turbina pokreće silama uzgona.



Slika 6.6. Pokretanje pri malim brzinama vjetra i prilagodba lopatica velikim brzinama vjetra

Time se postigla mogućnost pokretanja pri brzini vjetra manjoj od 1 m/s što znači da bi se vjetroturbina pokretala i pri malom povjetarcu. Preoblikovanjem lopatica dobiva se učinkovitost koja odgovara Darrieusovom tipu turbine.

Aerodinamična svojstva:

- Profil lopatica je aerodinamičan
- Hvata vjetar iz svih smjerova
- Mala brzina vjetra uzrokuje vrtnju (ispod 1 m/s)
- Visoki zakretni moment čak i pri malim brzinama vjetra
- Postiže velike brzine vrha lopatica u širokom rasponu brzine vjetra i time dobiva na iskoristivosti s obzirom na količinu dobivene električne energije
- Buka i vibracije su minimalne

Konstrukcijska svojstva:

- Izrađena je od izdržljivih dijelova koji podnose opterećenja izazvana rotacijom
- Stabilna konstrukcija podnosi ekstremno jake vjetrove i grmljavinu

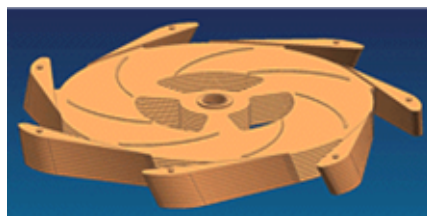
Eksterna svojstva:

- Zauzima manje prostora u usporedbi a horizontalnom vjetroturbinom iste snage
- Mogućnost upotrebe u urbanim sredinama
- Dijelovi se mogu reciklirati
- Ne šteti pticama

### 6.3.2. Tesnic

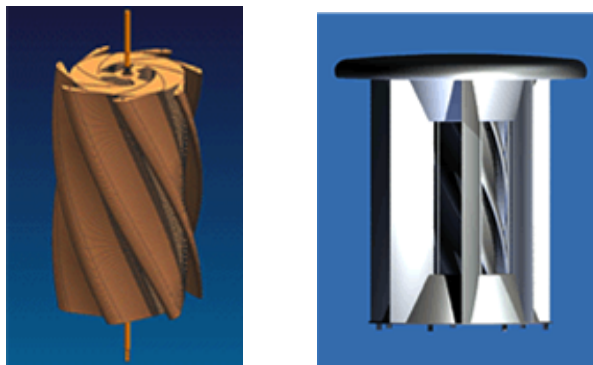
Tvrtka Tesnic nastala je 2005. u godine u Kanadi s fokusom na iskorištavanje energije vjetra. Ideja je nastala kroz potrebu za dobivanjem energije iz vlastitog izvora u slučaju nestanka struje iz mreže.

Vjetroturbina tvrtke Tesnic temelji se na principu rada Tesline i Darrieusove turbine. Ova vjetroturbina spada u skupinu vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje (VSVO). Sklop rotora sadrži više od 200 diskova naslaganih jedan na drugi s zračenošću od  $\approx 2\text{mm}$ . Na obodu diskova nalaze se lopatice aerodinamičnog oblika koje imaju ulogu usmjeravanja fluida tangencijalno na površinu diskova.



*Slika 6.7. Prikaz slaganja diskova unutar Tesnic vjetroturbine*

Oko rotora nalazi se sklop statora koji ima ulogu povećanja hvatanja vjetra tako što neutralizira turbulenciju na rotor. Raspodjela statorskih i rotorskih lopatica je takva da se vjetar usmjerava tangencijalno na površine diskova neovisno o smjeru vjetra. Razmještaj statorskih lopatica također onemogućuje prekid rotacije zaklanjajući rotor od turbulencija od vjetra iz bilo kojeg smjera.



Slika 6.8. Unutrašnjost vjetroturbine Tesnic i sklop uređaja

Tesnic turbina koristi energiju vjetra na nekoliko načina. Rotorske lopatice zahvaćaju vjetar na klasičan način, uzgonom. Nakon toga struja vjetra ulazi u prostor između diskova gdje prijanja uz površinu diskova i na principu Tesline turbine značajno doprinosi rotaciji rotora. Ovakav način iskorištavanja energije vjetra pomoću adhezije u odnosu na klasičan način pokretanja uzgonom, omogućuje ovoj vjetroturbini da postiže vrlo veliku učinkovitost.

Ova vjetroturbina ima jednaku učinkovitost pri turbulentnom strujanju vjetra zbog toga što vanjske lopatice zaklanjaju rotor. Osim toga te lopatice skrivaju rotor tako da su pokretni dijelovi jedva vidljivi pa je Tesnic vjetroturbina estetski uravnotežena s okolinom.

Masa je vrlo mala pa je vrlo pogodna za ugradnju na krov. Tako na primjer 3.6 kilovatna izvedba teži manje od 150 kg. Simulacije u zračnom tunelu pokazuju učinkovitost ove turbine.

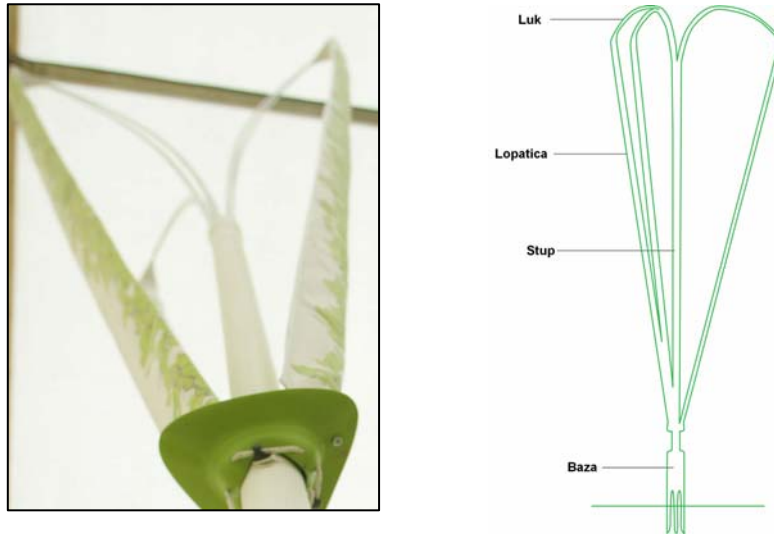
Model turbine	Izmjerena snaga	Približne dimenzije	Približna masa
T10K	10 kW	3.3 m visina, 3.3 m promjer	350 kg
T3600	3.6 kW	2 m visina, 2 m promjer	150 kg
T2K	2 kW	1.5 m visina, 1.5 m promjer	85 kg
T750	750 W	0.9 m visina, 0.9 m promjer	50 kg

Tablica 6.3. Modeli Tesnic vjetroturbina

Pokretanje se ostvaruje pri brzini vjetra od oko 3 m/s. A značajna ušteda električne energije se osjeća već pri brzini vjetra od 5 m/s.

### 6.3.3. Bri Domestic Wind Turbine

Nagrada na BSI Sustainability Design Awards 2007.



*Slika 6.9. Konstrukcija Bri Domestic vjetroturbine i njena skica*

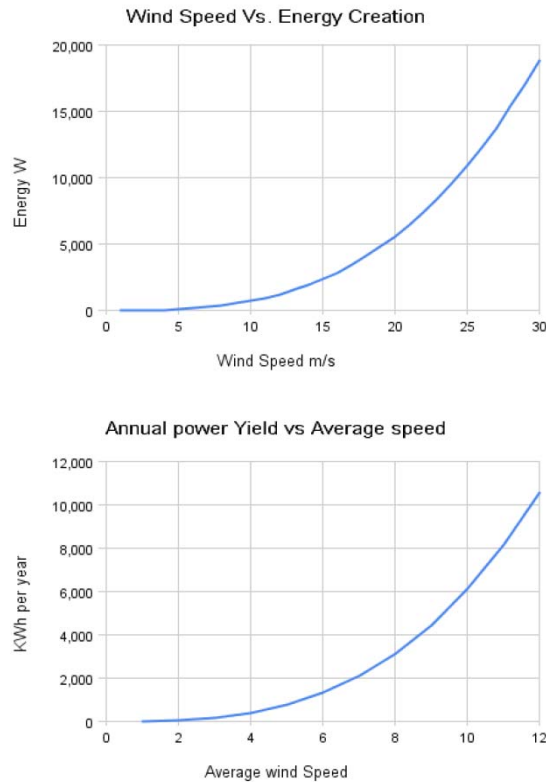
Ben Storan, student industrijskog dizajna s Royal College of Art UK (RCA) osmislio je dizajn vertikalne vjetroturbine. Zbog vertikalne izvedbe rotacija je sporija te omogućava turbini hvatanje turbulentnog toka zraka što je uobičajeno u urbanim sredinama. Također dobra strana ovakve izvedbe je tiši rad.

Za vjetroturbine slične veličine navodi se podatak generiranja 1kW električne energije pri brzini vjetra od 12 m/s, no obično proizvode samo 40% navedene snage. Za ovu konstrukciju tvrdi se da bi davala tri puta više što znači 1.2 kW.

Koriste se laki materijali što konstrukciji daje stabilnost, omogućuje bolje zahvaćanje energije vjetra i lakoću ugradnje. Izgled ove vjetroturbine podsjeća na Darrieusovu vjetroturbinu. Osnovna razlika je izbor materijala lopatica a samim time oblik lopatica je drugačiji. Materijal lopatica jest platno koje je napeto između baze i gornjih napinjača a oblikovano je tako da tvori profil lopatice.

Specifikacije:

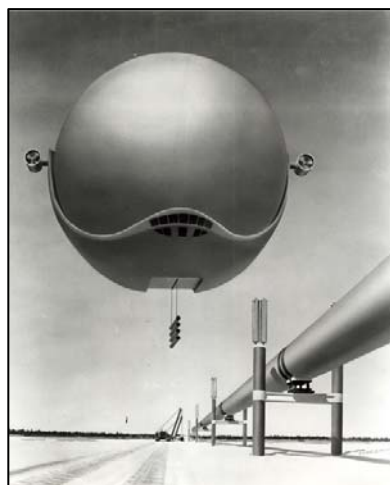
- Ukupna visina: 4 metra
- Promjer: 2.5 metra
- Masa: <30 kg
- Cijena: Približno 8000 kn
- Snaga: 1.2 kW pri brzini vjetra 12m/s



*Dijagram 6.1. Snaga u ovisnosti o brzini vjetra i energija dobivena kroz godinu u ovisnosti o prosječnoj brzini vjetra*

#### 6.3.4. Magenn MARS

Magenn Power je Kanadska tvrtka s tradicijom dugom 30 godina. Primarno se bave proučavanja naprednih materijala i struktura. Istraživanja su započela konstrukcijom Magnus zračne letjelice sfernog oblika 1978. Fred Ferguson patentirao je letjelicu Magnus 1980. godine. Na toj letjelici (*"Lakša od zraka"*) prvi puta se primijenio magnus efekt. Letjelica je bila napunjena helijem i na taj način dobivala je statički uzgon. Tijekom pravocrtnog gibanja sfera se rotirala i postigao se magnus efekt te se letjelica podizala.



*Slika 6.10 Letjelica "Lakša od zraka"*



Princip rada ove letjelice primijenio se na inovativnu vjetroturbinu MARS. MARS je lagana vjetroturbina na povodcu koja rotira oko horizontalne osi u odnosu na vjetar generirajući tako električnu energiju.



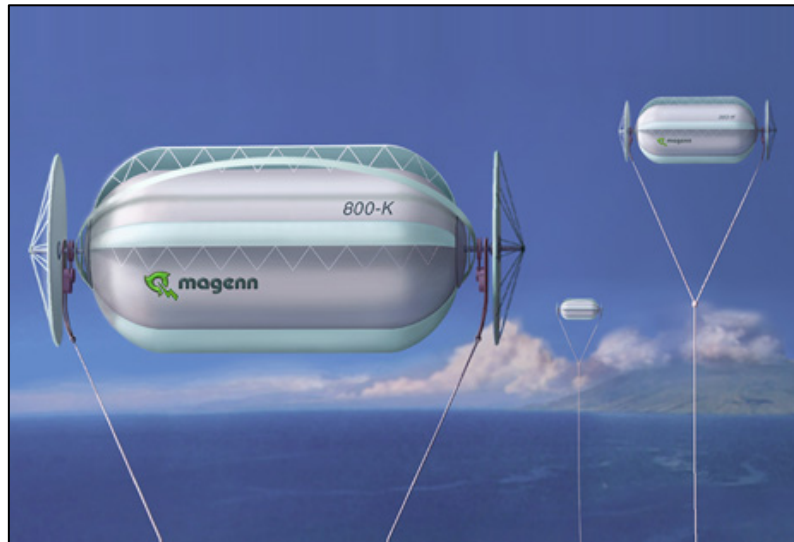
*Slika 6.11. MARS vjetroturbina*

Električna energija prenosi se povodcem dugim 300 m i koristi se za potrošnju ili za pohranu u bateriji. Helij održava MARS i podiže ju na veće visine od tradicionalnih vjetroturbina. Zahvaća vjetar koji se nalazi na visini od 180 do 300 metara i noćne tokove vjetrova koji se javljaju na skoro svim područjima zemlje. Rotacija ove vjetroturbine generira i Magnus efekt koji osigurava dodatni uzgon te na taj način stabilizira konstrukciju i pozicionira ju izvan kontroliranog i zabranjenog područja letova aviona.

Prednost MARS vjetroturbine jest to što njezina instalacija nije ograničena samo na prostore blizu obale ili na područjima gdje pušu jaki vjetrovi već se može instalirati bliže mreži zbog toga što doseže visinu od 300m gdje je vjetar ujednačene jačine. Ova turbina je mobilna i može se lako ispuhati i prenijeti bez potrebe za kranom. Sigurna je za ptice i šišmiše i ima malu emisiju buke. Može raditi u velikom rasponu brzine vjetra od 1 do više od 28 m/s.

MARS turbina može se koristiti na lokacijama kao što su otočna područja, farme te zabačena područja. Za svrhu pogona istraživačke opreme, kao pomoćni izvor energije za pumpe za vodu i prirodni plin, za napajanje medicinske opreme u unesrećenim područjima, kao i za velike vjetroelektrane.

Magenn Power Air Rotor sistem je zatvorena trodimenzionalna konstrukcija (cilindar). Daje veliki moment, počinje se okretati pri maloj brzini vjetra i sveukupno ima veću učinkovitost zbog činjenice što se može postaviti na veću visinu. Zatvorena struktura omogućuje proizvodnju ovih turbina u mnogo veličina, od vrlo malih do vrlo velikih i to za iznos mnogo manji no što je to za uobičajene vjetroturbine.



*Slika 6.12. MARS turbine velikih snaga na velikim visinama*

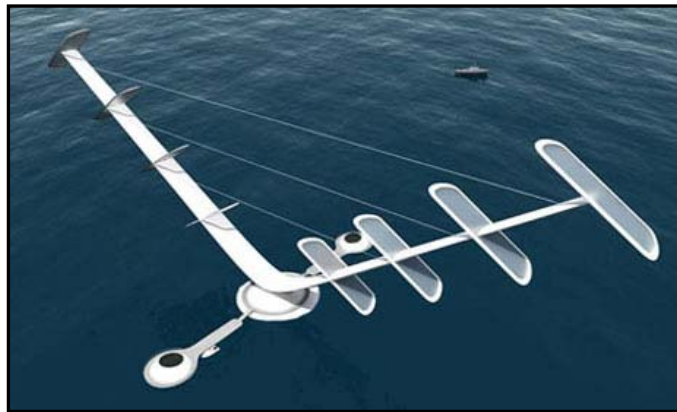
Prednosti Magenn Air Rotor sistema:

- Jeftiniji je po jedinici dobivene električne energije u odnosu na konkurentne proizvode
- Magenn Power Air Rotor sistem će u danom vremenu dati više nazivne energije od uobičajenih konstrukcija. Učinkovitost Magenn vjetroturbine biti će 40 do 50% što je vrlo važno budući da udvostručavanje kapaciteta upola smanjuje cijenu dobivene energije po vatu
- Vjetroelektrane mogu biti smještene bliže stanici tako da je smanjena potreba za izgradnjom dalekovoda
- Uobičajene vjetroturbine rade pri brzinama vjetra od 3 m/s do 16 m/s, a Magenn Air Rotors rade od 1 m/s do 28 m/s
- Magenn Air Rotors mogu se podići više tako da rade na većim visinama iznad površine zemlje. Postiže visine od 180 do 300 m bez potrebe izgradnje visokih stupova ili korištenja kranova za održavanje
- Mobilne su i lako ih je premještati na druge lokacije ovisno o vjetrovitosti područja. Mobilnost je vrlo važna u slučaju nužde ili nepogode

### **6.3.5. Aerogenerator**

Razvoj ove vjetroturbine potakla je potreba Velike Britanije za električnom energijom iz obnovljivih izvora. Konstrukciju je osmislio zrakoplovni inženjer David Sharpe. Visina ove vjetroturbine iznosi 144 m i a snaga 9 MW. Testiranje je izvedeno na manjoj konstrukciji nazivne snage 6 kW i rezultati pokazuju da su proračuni relativno točni za veće izvedbe.

Ovakva izvedba zapravo je Darrieusov tip vjetroturbine bez gornjeg dijela, tzv. V struktura uz dodana krilca na lopaticama. Ovakva izvedba eliminira potrebu za stupom u središnjem dijelu a centar mase je na dnu što olakšava izvedbu konstrukcije.



*Slika 6.13. Aerogenerator*

## **6.4. Izumi bez podataka o snazi**

### **Turbina australskog izumitelja Graeme Atteya**

Modularna vjetroturbina koja se postavlja na krov kuće. Pet ovakvih turbina proizvođile bi dovoljno struje za domaćinstvo. Radi pri vjetru malih brzina. Prednost ovakve konstrukcije je iskorištavanje zračnog toka koji se koncentrira oko i preko građevine te povećava svoju brzinu. Negativna strana ove konstrukcije je nemogućnost hvatanja vjetra iz svih smjerova.

Graeme Attey dobio je državnu (Australija) subvenciju od 32000 dolara. Procjenjuje se cijena od 700 dolara po komadu.

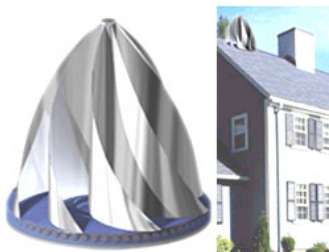


*Slika 6.14. Vjetroturbina Graemea Atteya*

Oblik lopatica ove vjetroturbine jest aerodinamičan te se ona svodi na pojednostavljenu verziju Darrieus-ove vjetroturbine H-tipa.

### **Mag – Wind**

Ovu konstrukciju razvili su Kanađani Thomas Priest-Brown i Jim Rowan a proizvedena je u Texasu. U postolju ove vjetroturbine nalazi se magnetski levitirajući generator s aksijalnim tokom varijabilnog otpora namota.



*Slika 6.15. Mag – Wind vjetroturbina*

Ova izvedba ne opravdava vrijednosti navedene od tvoraca jer nije izvršeno pravilno testiranje.

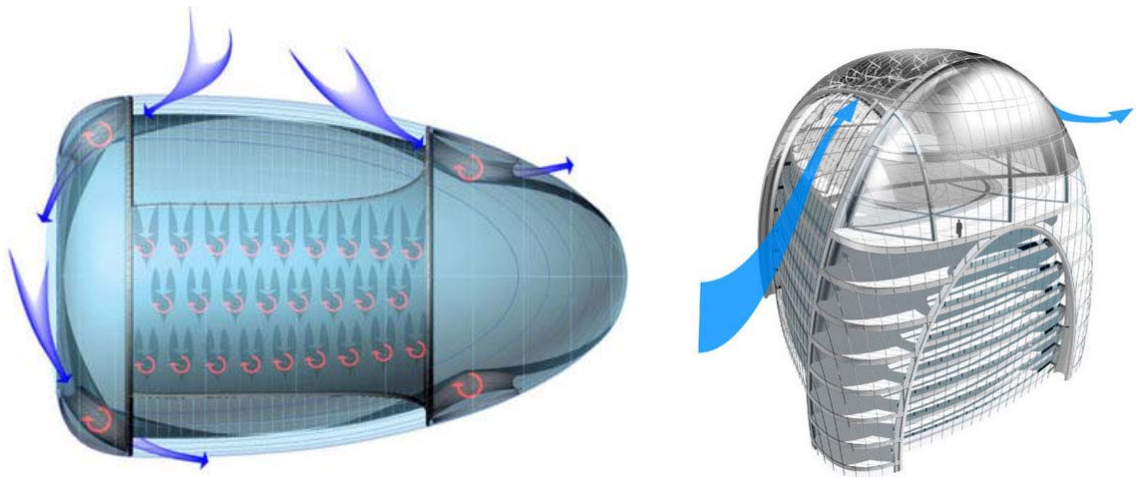
## **7. Arhitektura u skladu s energijom vjetra**

U svijetu je s pojavom pojačane svijesti o ekološkim problemima došlo i do pojave sve većeg broja arhitektonskih rješenja koja se baziraju na iskorištavanju potencijalne energetske učinkovitosti samih građevina.

Za razliku od pokušaja da se vjetroturbine uklope u već postojeće komplekse, nova rješenja daju prednost maksimalnom iskorištavanju energije vjetra na način da se građevine svojim oblikom prilagode vjetroturbinama. Time se osim estetski zanimljive i funkcionalne građevine, što je i glavni cilj pri njihovoj gradnji, dobiva na povećanju učinkovitosti vjetroturbina koje se uklapaju u spomenute komplekse. Građevina je energetska učinkovita i da time osigurava značajan udio u opskrbljivanju potreba za električnom energijom ljudi koji se u njoj nalaze.

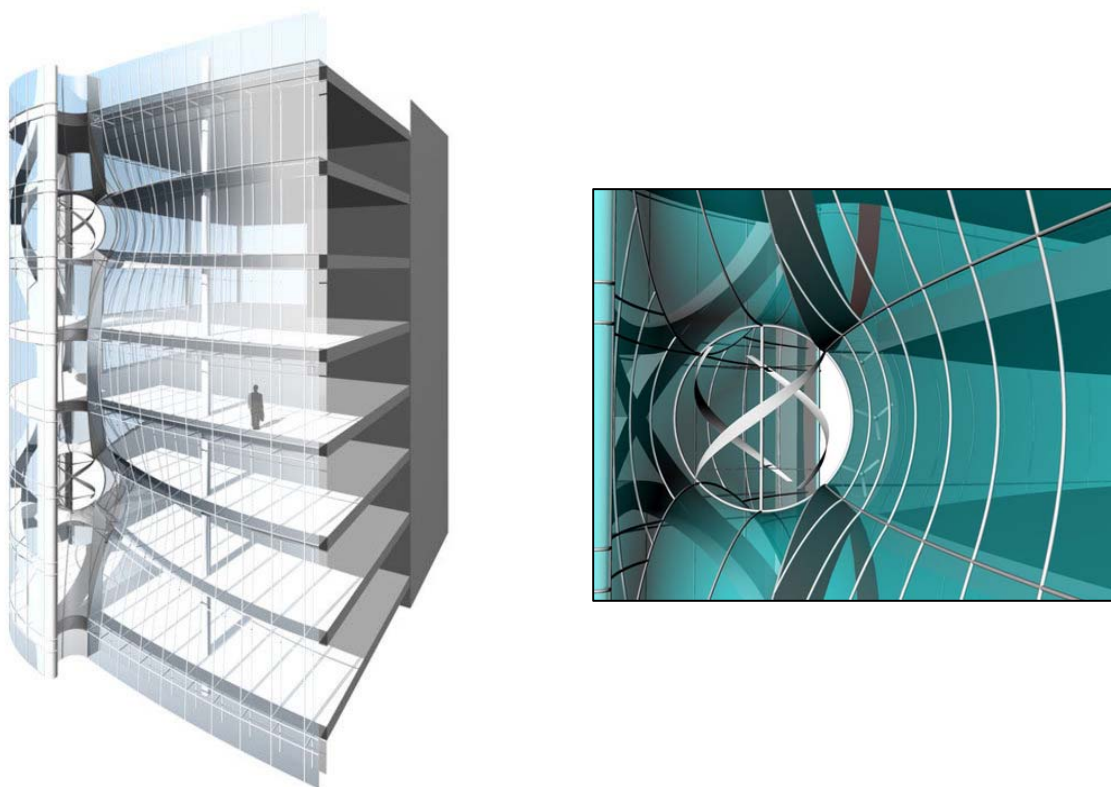
S obzirom da je cilj građevina ovakvog tipa uglavnom zadovoljiti taštinu čovjeka za dostizanjem velikih visina, odmah se nameće odgovor na pitanje zašto su one idealne za iskorištavanje energije vjetra. Kao što je već objašnjeno brzina vjetra raste s visinom pa su visoke građevine idealne za podizanje vjetroturbina na veću visinu bez potrebe za stupovima. Osim toga oblikom same građevine može se povećati brzina vjetra i na taj način dodatno povećati iskoristivost.

Raspoloživa energija može se iskoristiti za napajanje rashladnih i ventilacijskih uređaja te rasvjete. U kombinaciji s solarnim kolektorima može se postići vrlo visoka iskoristivost obnovljivih izvora energije, a spajanjem na mrežu osigurava izbjegavanje neželjenih problema ukoliko zbog nepredvidljivosti izvora dođe do nedostatka električne energije. Što se tiče ekonomske isplativosti cijena ovih uređaja u odnosu na cijenu cijele konstrukcije su zanemarivi.



*Slika 7.1. Koncept građevine s instaliranim vjetroturbinama (1)*





*Slika 7.12. Koncept građevine s instaliranim vjetroturbinama (2)*



*Slika 7.3. Prva građevina s instaliranim vjetroturbinama (3)*

## 8. Potrebe za električnom energijom u kućanstvu

Analiza potrebe za električnom energijom napravljena je za kućanstvo koje ima dva člana. Električni uređaji koji se koriste u kućanstvu pobrojani su u tablici zajedno s njihovom maksimalnom potrošnjom u vatima.

Uređaji	Max W	Sati tjedno	Postotak
Rasvjeta	600	42	25
Televizor	80	84	50
Hladnjak	120	168	100
Računalo	500	84	50
Pećnica	2000	10.5	6
Perilica rublja	2200	6	4
Ušisavač	1800	0.5	0.3
Glačalo	2000	1	0.6
<b>Ukupno</b>	<b>9300</b>		

Tablica 8.1. Električni uređaji u kućanstvu

S obzirom da su neki uređaji konstantno priključeni na izvor električne energije a neki samo povremeno tablično je prikazano koliko sati tjedno se koristi određeni električni uređaj. Tako se može vidjeti da je hladnjak priključen na električnu mrežu 24 sata dnevno dok se glačalo koristi svega jedan sat u tjednu. Naravno mora se uzeti u obzir i činjenica da se kompresor hladnjaka uključuje samo kada se temperatura podigne iznad one koja je određena regulatorom. Isti princip rada imaju glačalo i pećnica, no kod njih se grijači pale kada se temperatura spusti. Perilica rublja električnu energiju koristi za zagrijavanje vode i za pokretanje motora koji okreće bubanj pa se može zaključiti da se nakon što je voda zagrijana počinje trošiti manje el. energije jer se ona troši samo za vrtnju motora.

Prikupljanjem podataka kroz 30 jesenskih dana dobiveni su slijedeći podatci:

Ukupno je potrošeno je 162 kWh uz upotrebu uređaja u vremenskom razdoblju kako je prikazano u tablici. Od toga je 123 kWh potrošeno u višoj tarifi u vremenu od 07-21 sati a 39 kWh u nižoj tarifi od 21-07 sati.

Vrijeme potrošnje	Viša tarifa prosječno kWh	Niža tarifa prosječno kWh
Preko tjedna	4	1,5
Vikend	5,8	1

Tablica 8.2. Dnevna potrošnja električne energije u kilovat satima

Vrijednosti koje su dobivene dijeljenjem potrošene energije s vremenom u kojem su uređaji korišteni daju samo prosječni prikaz dnevne potrošnje. Potrošnja više tarife dijeli se na 13 sati (okvirno vrijeme od trenutka paljenja prvog električnog uređaja do početka brojenja druge tarife u 21 sati), dok se potrošnja niže tarife dijeli na 2 sata i dvadeset minuta (vrijeme od početka brojenja niže tarife do trenutka gašenja zadnjeg električnog uređaja).

Vrijeme potrošnje	Viša tarifa prosječno W	Niža tarifa prosječno W
Preko tjedna	307	644
Vikend	446	429

*Tablica 8.3. Dnevna potrošnja u vatima*

S obzirom da je izračunata vrijednost potrošnje raspoređena jednoliki na svaki sat ne može se sa sigurnošću reći kolika je maksimalna dnevna potrošnja jer se može dogoditi da se potrošnja naglo poveća uključivanjem nekoliko trošila velike potrošnje npr. istovremeni rad perilice, pećnice i glačala. Maksimalna potrošnja događa se istovremenim uključivanjem svih uređaja i radu na nazivnoj snazi. Ta vrijednost iznosi 9,3 kW. Za vrijeme ove analize niti jednom se nije dogodilo da su sva četiri velika potrošača (perilica, glačalo, pećnica, usisavač) uključena u isto vrijeme, a niti cjelokupna rasvjeta, što ukazuje na to da se maksimalna potreba od 9,3 kW ne pojavljuje često.

Ako se analizira dnevna potrošnja s obzirom na navike ukućana može se doći do realnih podataka maksimalne potrošnje. Glavnina uređaja koji se koriste istovremeno tokom dana su:

- hladnjak
- televizor
- računalo
- rasvjeta (tri žarulje ukupno 175 W)

što daje ukupnu vrijednost od 875 W

Ako se tome dodaju još dva veća potrošača npr. perilica za rublje i pećnica dobivamo vrijednost od 5075 W. Vrijednost maksimalne potrošnje uglavnom neće mnogo odstupati od ove vrijednosti pa se tako za maksimalnu dnevnu potrošnju može uzeti vrijednost od 5,5 kW.



## 9. Razvoj proizvoda – vertikalna vjetroturbina

Da bi pristupili razvoju konkretnog proizvoda potrebno je razmotriti što se zapravo traži od samog razvoja. Odgovor na ovo pitanje daju tehnički upitnik i definicija cilja. Tehničkim upitnikom stvaraju se granice kojima se usmjerava razvoj te se na taj način sprječava mogućnost prevelikog broja mogućih rješenja problema koja nisu korisna. Definicija cilja s druge strane govori da li je takav proizvod zaista potreban tj. da li postoje korisnici koji će ga koristiti.

Za vertikalnu vjetroelektranu koja je pogodna za kućnu upotrebu tehnički upitnik daje jasan cilj razvoja:

### TEHNIČKI UPITNIK - za definiranje cilja razvoja proizvoda

**1. Što je stvarni problem koji treba riješiti?**

Smanjiti cijenu energenta.

**2. Koja implicitna očekivanja i želje je potrebno uključiti u razvoj?**

Korištenje obnovljivog izvora energije, vjetra. Postići što veću korisnost.

**3. Da li su pretpostavljene potrebe korisnika, funkcionalni zahtjevi i ograničenja zaista realni?**

Cijena energenata raste, a istovremeno i briga za očuvanje okoliša. Pretraživanjem internetskih stranica i anketiranjem može se vidjeti da interes ljudi za ovakvim oblikom proizvodnje el. energije raste.

**4. U kojim smjerovima postoje mogućnosti za kreativni razvoj i inventivno rješavanje problema?**

Približavanje teoretskoj granici iskoristivosti VSVO njenim oblikom i smanjenje cijene.

**5. Ima li limita na kreativnost u razvoju?**

Energija se mora pretvoriti u električnu.

**6. Koje karakteristike/svojstva proizvod nužno mora imati?**

Sigurnost, pouzdanost, što veću iskoristivost u odnosu na dimenzije rotora i cijenu. Jednostavnost primjene, instalacije i implementacije u el. energetske sustav.

**7. Koje karakteristike/svojstva proizvod sigurno ne smije imati?**

Ne smije biti prevelik, pretežak i opasan.

**8. Koji se aspekti razvoja mogu i trebaju kvantificirati u ovom trenutku?**

Masa koju može podnijeti krov ili zid prosječnog objekta. Snaga, profit, analiza tržišta i potrebe kupaca. Geometrijske karakteristike.

**9. Da li su razvojni zadaci postavljeni na prikladnoj razini apstrakcije?**

Cijena energenta smanjuje se i ukoliko je samo dio el. energije dobiven od vjetroelektrane, nije nužno u potpunosti prekinuti potrošnju el. energije mreže.

**10. Koja su tehnička i tehnološka ograničenja naslijeđena iz prethodnog iskustva sa sličnim proizvodom?**

Relativno mala snaga s obzirom na veličinu konstrukcije.

<b>DEFINICIJA CILJA</b> ZA RAZVOJ PROIZVODA	Naziv projekta: <b>Vertikalna vjetroelektrana</b>
<b>Opis proizvoda:</b>	
Vertikalna vjetroelektrana za upotrebu na stambenim i poslovnim objektima.	
<b>Primarno tržište:</b>	
Seoska gospodarstva. Poslovne hale izvan grada. Stambeni i poslovni objekti u selima i manjim gradovima. Visoki gradski objekti (rasvjetni stupovi). Dalekovodi (ukoliko je moguće pričvršćenje).	
<b>Sekundarno tržište :</b>	
Vlasnici nekretnina koji ne spadaju u gornju skupinu a imaju objekt koji se nalazi na povoljnoj poziciji s obzirom na brzinu vjetra.	
<b>Koje karakteristike se podrazumijevaju:</b>	
Proizvodnja el. energije zadovoljavajuće kvalitete. Životni vijek od 10 – 15 godina. Proizvod mora biti siguran za upotrebu.	
<b>Ciljane grupe korisnika:</b>	
Fizičke i pravne osobe koje su vlasnici nekretnina ili su ovlašteni za odluke o postavljanju ovakvog uređaja na objekt.	
<b>Pravci kreativnog razvoja:</b>	
Oblik rotora, položaj i odnosi između dijelova na uređaju, odabir vrste generatora te odabir materijala. Kompaktna izvedba uređaja. Estetski bitne karakteristike.	
<b>Limiti projekta:</b>	
Izvedba vjetroturbine mora biti vertikalna.	

Vodeći računa o navedenim ciljevima i pravcima razvoja izrađuje se morfološka matrica koja daje pregled mogućih tehničkih rješenja tržene konstrukcije. Izradom morfološke matrice na temelju obavljenog istraživanja postojećih konstrukcija vertikalnih vjetroturbina generirati će se tri koncepta koji će se ocijeniti prema glavnim potrebama korisnika. Glavne potrebe korisnika dobivene su anketiranjem 70 osoba različitih dobnih skupina.

Ocjena važnosti	Glavne potreba korisnika
8	Količina proizvedene električne energije
7	Cijena nabave takvog uređaja
6	Sigurnost
5	Cijena održavanja
4	Buka ne smije biti visoka
3	Mogućnost dobivanja naknade od HEP-a
2	Mora biti sigurna za ptice
1	Estetika

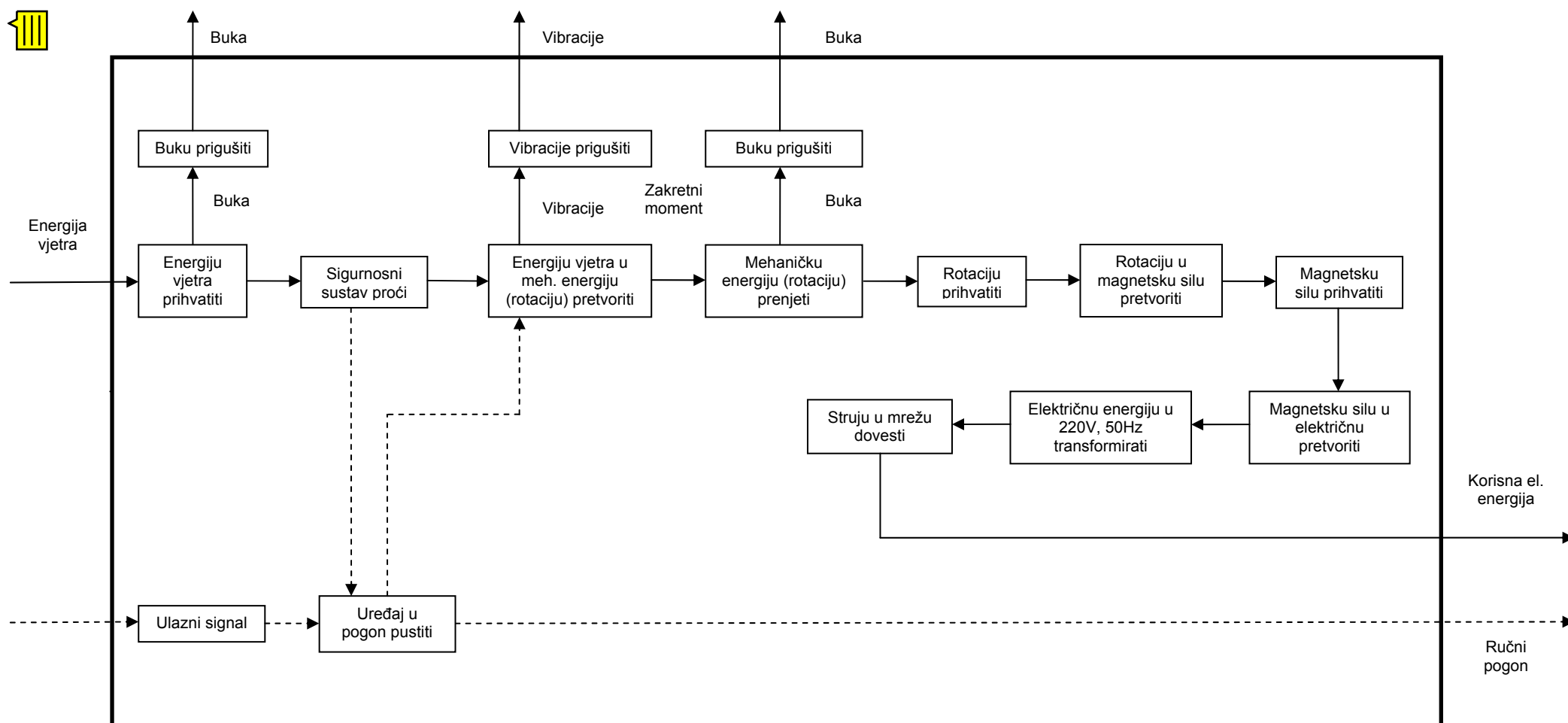
Tablica 9.1. Glavne potrebe korisnika

Iz tablice se može zaključiti kako je učinkovitost vjetroturbine najvažniji faktor, nadalje vrlo je važna cijena nabave takvog uređaja dok je treća najbitnija stvar sigurnost. Ovakvi rezultati ankete su vrlo logični s obzirom da je svrha uređaja proizvodnja električne energije, tj. to je osnovna funkcija proizvoda. Cijena je danas neupitan faktor pa tako uvijek ima mjesto na vrhu ljestvice zahtjeva. Potreba za sigurnošću se podrazumijeva i vezana je uz svaki proizvod koji se plasira na tržište. Ne tako mali utjecaj na to koji će proizvod netko odabrati a drugi neće jest cijena održavanja, naime inicijalni izdatci su samo početak ulaganja, dok se održavanje može pokazati vrlo nezahvalnim ukoliko proizvod nema lako izmjenjive, dostupne i cijenom prihvatljive rezervne dijelove. Buka je nešto što se izravno povezuje s ovakvim uređajima te se uglavnom javlja osjećaj nelagode na pomisao da će ovakav uređaj biti postavljen na stambeni objekt, zbog toga je buka faktor na koji se mora obratiti pažnja. Ostale potrebe navode se kao poželjne, a to su mogućnost dobivanja naknade za električnu energiju predanu mreži što je zapravo omogućeno jer HEP ugrađuje brojilo između uređaja i mreže pa se tako vrši umanjeње računa za struju. Sigurnost za ptice očituje se u obliku lopatica vjetroturbine i brzini vrtnje (što je brzina manja vjetroturbina je bezopasnija). Estetika je faktor koji je uvijek poželjan no uglavnom nije presudan za odabir.

Da bi se izradila morfološka matrica potrebno je znati sve funkcije proizvoda. Funkcije proizvoda određuju se pomoću funkcijske dekompozicije. Osnovne funkcije proizvoda su:

- Prihvatiti energiju vjetra
- Pretvoriti energiju vjetra u mehaničku energiju (rotaciju)
- Dovedi struju u mrežu

Pomoću osnovnih funkcija potrebno je definirati među funkcije koje ih povezuju. Time se dobiva jasan tok energije, (materijala).



Slika 9.1. Funkcijska struktura

Morfološka matrica

Energiju vjetra prihvatiti										
Sigurnosni sustav proći	Digitalno mjerenje brzine					Analogno mjerenje brzine				
Energiju vjetra u mehaničku energiju (rotaciju) pretvoriti	Lopatice i vratilo iz jednog dijela		Lopatice vezane za vratilo zavarom (sa ili bez dodatnih dijelova)		Lopatice vezane za vratilo oblikom (sa ili bez dodatnih dijelova)		Lopatice vezane za vratilo vijcima (sa ili bez dodatnih dijelova)			
Mehaničku energiju (rotaciju) prenjeti										
Rotaciju prihvatiti	Kruta spojka					Rastavljiva spojka				

Rotaciju u el. energiju pretvoriti	Generator		
Buku prigušiti	Izolirano kućište		
Vibracije prigušiti	Prigušivač	Spoj vijcima	Spoj zakovicama
Ulazni signal	Ručica	Pritisak na gumb	Touch screen
Pričvršćivanje na objekt	Pričvršćivanje na krov objekta	Pričvršćivanje na zid objekta	

Tablica 9.2. Morfološka matrica

## Koncept 1

Vrsta lopatica za prihvaćanje vjetra:

- lopatice zavarene na vratilo
- vertikalni položaj vratila
- kruti spoj motora i turbine
- uležištenje vratila samo s donje strane

Sigurnosni sustav:

- digitalni mjerač brzine
- kočnica

Pretvorba energije vjetra u meh. energiju:

- Lopatice vezane za vratilo zavarom uz dodatne dijelove



Slika 9.2. Koncept 1 – lopatice

Prednosti:

- Mali broj dijelova
- Jednostavna izvedba
- Mala masa
- Učinkovitost neovisna o smjeru puhanja vjetra
- Napadni kut na jednu lopaticu s obje strane vjetroturbine
- Ujednačen moment tijekom cijelog okreta, nema pulsacija
- Manje opterećenje na ležajeve zbog poništavanja aksijalnih sila
- Ovakav oblik lopatice smanjuje otpor rotaciji
- Hvatanje turbulentnih struja iznad krovova
- Samopokretanje

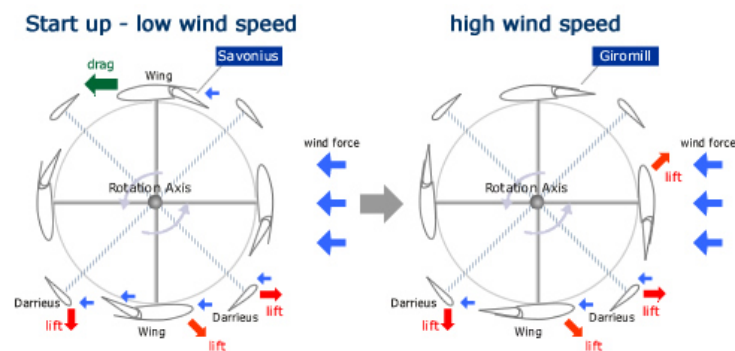
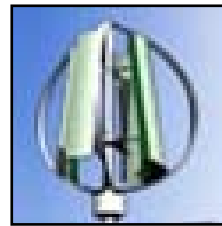
Nedostatci:

- Lopatice moraju imati aerodinamični profil i trodimenzionalno su zakrivljene
- Komliciranija izrada lopatica
- Velike brzine vrtnje – povećano habanje dijelova

## Koncept 2

Vrsta lopatica za prihvaćanje vjetra:

- lopatice zavarene na vratilo
- vertikalni položaj vratila
- kruti spoj motora i turbine
- uležištenje samo s donje strane



Slika 9.3. Koncept 2 - lopatice

Sigurnosni sustav:

- digitalni mjerač brzine
- kočnica

Pretvorba energije vjetra u meh. energiju:

- Lopatice vezane za vratilo zavarom uz dodatne dijelove

Prednosti:

- Savijene lopatice mogu biti izrađene od lakog materijala jer su učvršćene na dva mjesta
- Učinkovitost neovisna o smjeru puhanja vjetra
- Hvatanje turbulentnih struja iznad krovova
- Kombinacija H-izvedbe i osnovne Darrieus-ove izvedbe povećava učinkovitost ove izvedbe
- Samopokretanje

Nedostatci:

- Lopatice moraju imati aerodinamični profil
- Veliki broj dijelova
- Napadni kut na lopaticu samo kada je ona u povoljnom položaju u odnosu na vjetar (nemiran rad zbog ravnih lopatica)
- Komplicirana izvedba mehanizma za samopokretanje (zakretanje stražnjeg dijela lopatica)
- Zbog velikog broja lopatica jedna lopatica može stvarati zavjetrinu onoj iza sebe



### Koncept 3

Vrsta lopatica za prihvaćanje vjetra:

- lopatice zavarene na vratilo
- vertikalni položaj vrtila
- kruti spoj motora i turbine
- uležištenje samo s donje strane

Sigurnosni sustav:

- digitalni mjerač brzine
- kočnica

Pretvorba energije vjetra u meh. energiju:

- Lopatice vezane za vratilo zavarom uz dodatne dijelove



Slika 9.4. Koncept 3 – lopatice

Prednosti:

- Učinkovitost neovisna o smjeru puhanja vjetra
- Napadni kut na jednu lopaticu s obje strane vjetroturbine
- Ujednačen moment tijekom cijelog okreta, nema pulsacija
- Manje opterećenje na ležajeve zbog poništavanja radijalnih sila
- Ovakav oblik lopatice smanjuje otpor rotaciji
- Hvatanje turbulentnih struja iznad krovova
- Samopokretanje pri vrlo malim brzinama vjetra pa je učinkovitost veća na području manjih vjetropotencijala
- Brzina vrtnje nije jako velika

Nedostatci:

- Nešto manja snaga

## Odabir najboljeg koncepta

Potrebe korisnika	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3
Korisnost	9	9	9
Cijena	3	3	10
Sigurnost	6	4	8
Održavanje	3	2	9
Buka	8	6	9
Sigurna za ptice	8	5	10
Estetika	3	1	3

Tablica 9.3. Ocjenjivanje koncepta

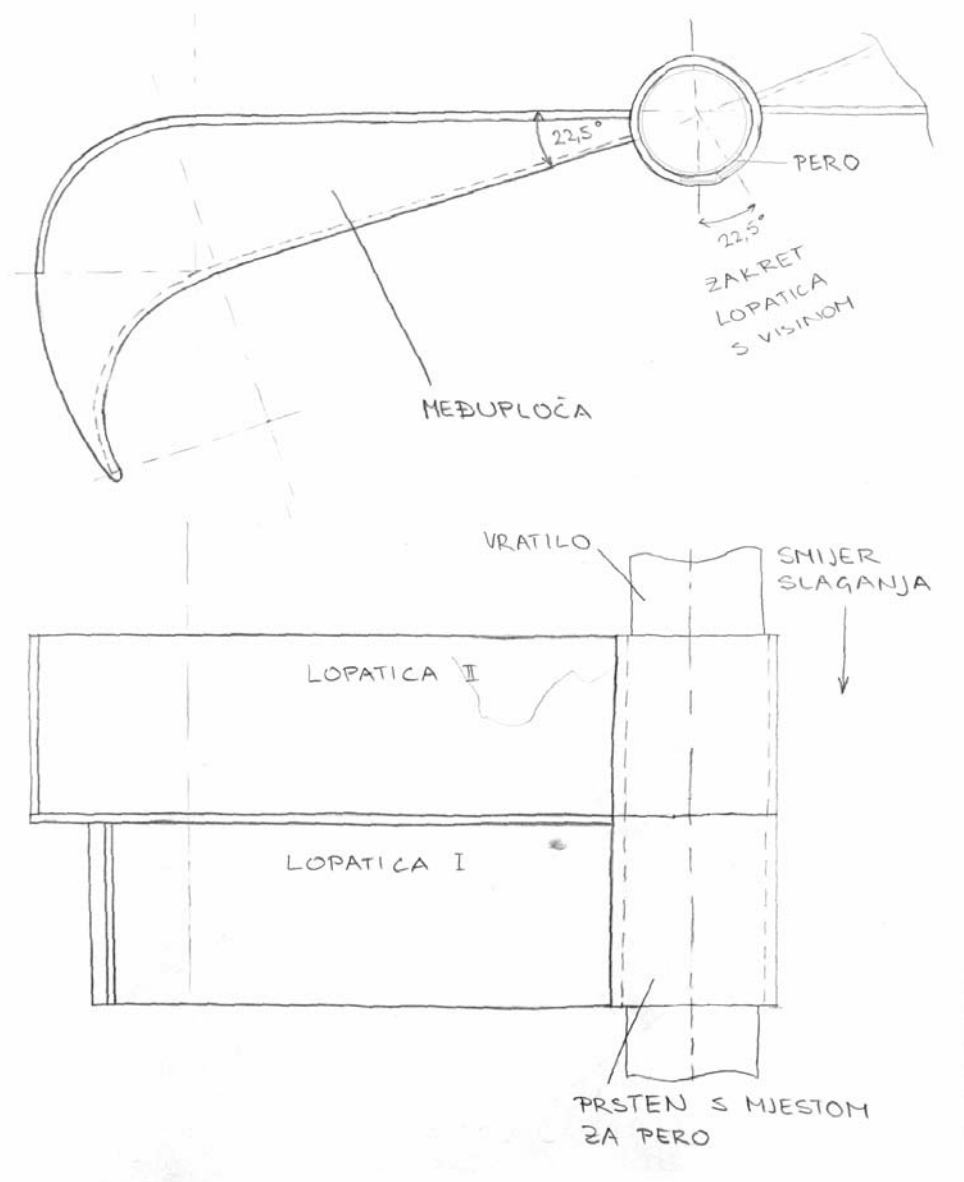
Umnožak ocjena važnosti s ocjenom koncepta svake potrebe daje vrijednost prema kojoj se odabire koncept:

Koncept 1 – 195  
 Koncept 2 – 162  
 Koncept 3 – **294**

Odabire se koncept 3 kao najbolji s obzirom na potrebe korisnika. Ovaj koncept najviše konkurira ostalima kada se u pitanje dovede cijena. Naime cijena ovog uređaja znatno pada kada se usporede lopatice sva tri koncepta. Lopatice nisu aerodinamičnog oblika i kao takve vrlo su jednostavne za izradu. Tu je također važan i broj dijelova koji je kod koncepta 3 relativno velik jer se lopatice modularno slažu jedna na drugu, no s obzirom da je oblik svih lopatica i njihovih dijelova identičan te su svi dijelovi izuzetno jednostavni za izradu, to ne povećava troškove. Održavanje je zbog modularnosti jednostavno jer su dijelovi lako izmjenjivi a zbog jednostavnosti su lako dostupni jer ne zahtijevaju kompliciranu izradu. Zbog nešto manje brzine vrtnje ovaj koncept je općenito sigurniji, a i buka je manja.

## 10. Razrada odabranog koncepta

Nakon obrazloženog odabira koncepta daljnjom razradom osmisлити će se konstrukcija koja će zadovoljiti sve navedene funkcionalne zahtjeve. Dodatni zahtjev koji se indirektno postavlja budući da konstrukcija mora biti lako dostupna jest jednostavnost pričvršćivanja na objekt. Sa svim zahtjevima u vidu počinje se od detaljiranja lopatica turbine te dodatnih dijelova s kojima su direktno povezane.



Slika 10.1. Razrada lopatica s dodatnim dijelovima

Lopaticice se nalaze na vratilu kako je prikazano na slici 10.1. Vjetar preko lopatica opterećuje vratilo te je potrebno izvršiti dimenzioniranje vratila prema opterećenju koje će se pojaviti u eksploataciji. Za proračun se uzima referentna brzina vjetra od 16 m/s. Prema Beaufortov-oj ljestvici jačine vjetra ova brzina karakterizira žestok vjetar te je za potrebe ovog proračuna zadovoljavajuća.

## 11. Proračun

Dimenzije turbine:

$H = 2\text{m}$  - visina

$r = 0,5\text{m}$  - polumjer kola

$L = 2.2\text{m}$  - dužina vratila

$V_{vj} = 16\text{ m/s}$  - brzina vjetra

Opterećenje na vratilu:

$$F = \Delta p \cdot A$$

$$\Delta p = c_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{sr}^2$$

$$c_p^+ = 1.42 \quad c_p^- = 0.38$$

$$\rho = 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$v_{sr} = 16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$A^{+/-} = 0.5\text{m}^2$$

$$\Delta p^+ = 1.42 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.2 \cdot 16^2$$

$$\Delta p^+ = 218\text{Pa}$$

$$\Delta p^- = 0.38 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.2 \cdot 16^2$$

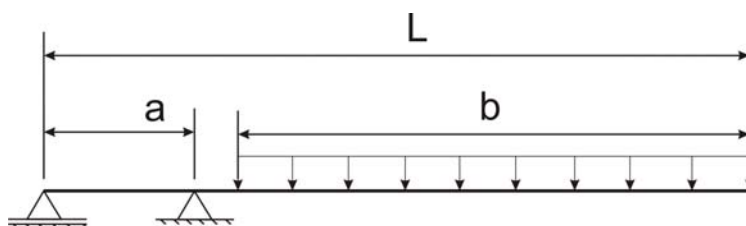
$$\Delta p^- = 58\text{Pa}$$

Sile na turbinu:

$$F^+ = \Delta p^+ \cdot A^{+/-} = 218 \cdot 0.5 = 109\text{N}$$

$$F^- = \Delta p^- \cdot A^{+/-} = 58 \cdot 0.5 = 29\text{N}$$

Sila na vratilo uzima se kao kontinuirana u horizontalnoj ravni:



$$L = 2.2\text{m}, \quad a = 0.170\text{m}, \quad b = 2\text{m}$$

$$q^+ = \frac{F}{b} = \frac{109}{2} = 54,5$$

$$q^- = \frac{F}{b} = \frac{29}{2} = 14,5$$

$$q_{uk} = q^+ + q^- = 69 \frac{N}{m}$$

$$q_{korisno} = q^+ - q^- = 40 \frac{N}{m}$$

Moment vrtnje:

$$\lambda = \frac{r\omega}{v_{vjetra}}$$

$\lambda = 0.8$  - koeficijent brzohodnosti

$v_{vj.}$  - za proračun se uzima 16 m/s

$$\omega = \frac{\lambda \cdot v_{vj.}}{r} = \frac{0.8 \cdot 16}{0.5} = 25,6 \frac{rad}{s}$$

$$n = \frac{\omega \cdot 30}{\pi} = \frac{25,6 \cdot 30}{\pi} = 244 \text{ } \circ/\text{min}$$

$$T = F \cdot r'$$

$r'$  – krak sile na sredinu površine lopatice od simetrale vjetroturbine

$$T = q_{kor} \cdot b \cdot r' = 40 \cdot 2 \cdot 0,28 = 22,4 Nm$$

Snaga na turbini:

$$P = T \cdot \omega = 22,4 \cdot 25,6 = 573 \text{ W} \approx 0.5 \text{ kW}$$

Materijal vratila i potrebna sigurnost:

St 52-3 (Č.0561)

$$S_{potr.} = 1.4$$

Masa sklopa lopatica:

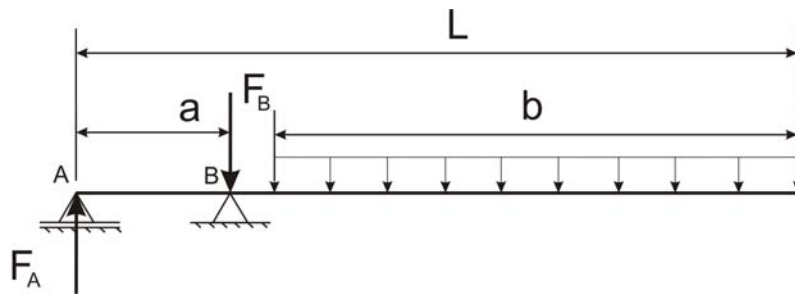
$$m = 127 kg$$

$$G = 127 \cdot 9.81 = 1246 N = 1.25 kN$$

Torzijsko opterećenje:

ISTOSMJERNO

Proračun horizontalnih sila:



$$L = 2.2m, a = 0.170m, b = 2m$$

$$\Sigma M_B = 0$$

$$(-F_A \cdot a) + q \cdot b \cdot (L - a - \frac{b}{2}) = 0$$

$$F_A = \frac{69 \cdot 2 \cdot 1.03}{0.17} = 836N$$

$$\Sigma F_H = 0$$

$$-F_A + F_B - q \cdot b = 0$$

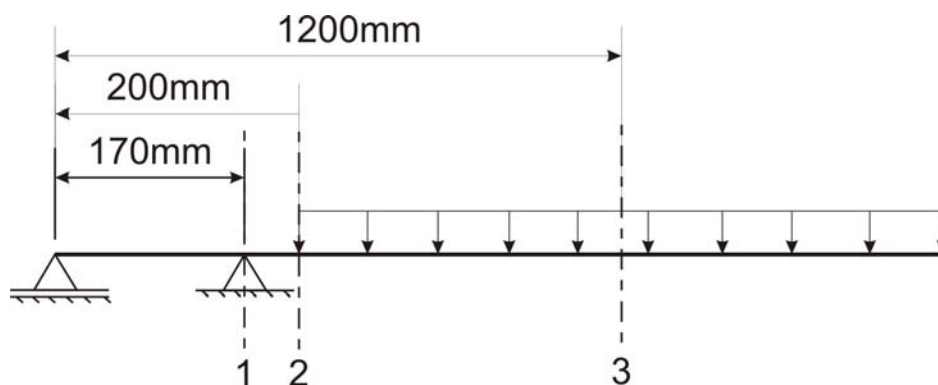
$$F_B = F_A + q \cdot b = 836 + 69 \cdot 2 = 974N$$

Proračun idealnog oblika vratila:

$$\text{ - za č.0561 } \quad \sigma_{fDN} = 240N/mm^2 \quad \tau_{tDI} = 190N/mm^2$$

$$\sigma_{fDNdop} = 50N/mm^2$$

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1.73 \cdot \tau_{tDI}} = \frac{240}{1.73 \cdot 190} = 0.73$$



Presjeci 1 i 2 napregnuti su samo savojno (fleksijski)

$$x_1 = 170mm \quad d_{x_1} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot F_A}{\sigma_{fDdop}} \cdot x_1} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 836}{50} \cdot 170} = 30mm$$

$$x_2 = 200mm \quad d_{x_2} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_2}{\sigma_{fDNdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 166256}{50}} = 32mm$$

$$M_2 = F_A \cdot 200 - F_B \cdot 30 = 836 \cdot 200 - 974 \cdot 30 = 166256 Nmm$$

Presjek 3 napregnut je istovremeno savojno i uvojno (fleksijski i torzijski)

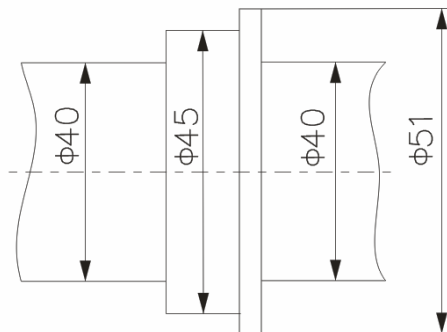
$$x_3 = 1200mm \quad d_{x_3} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{red_3}}{\sigma_{fDNdop}}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 48210}{50}} = 21mm$$

$$M_{red_3} = \sqrt{M_3^2 + 0.75(\alpha_0 \cdot T)^2} = \sqrt{46.16^2 + 0.75(0.73 \cdot 22)^2} = 48.2 Nm = 48210 Nmm$$

$$M_3 = F_A \cdot 1.2 - F_B \cdot 1.03 + q \cdot 1 \cdot 0.5 = 836 \cdot 1.2 - 974 \cdot 1.03 = 46.16 Nm = 46160 Nmm$$

$$T = 22 Nm$$

Dimenzije vratila:



Ležaj oslonca A:

$$F_A = 0.84 kN = F_r = P$$

$$d_1 = 40mm$$

$$n = 224 \text{ } \frac{\circ}{\text{min}}$$

$$\text{Sigurnost nošenja: } \frac{C}{P} = 4.5$$

$$C_1 = P \cdot \left( \frac{C}{P} \right) = 0.84 \cdot 4.5 = 3.8 kN$$

Kuglični ležaj, katalog SKF: 61908

$$d = 40\text{mm}$$

$$D = 62\text{mm}$$

$$b = 12\text{mm}$$

$$C = 13.8\text{kN}$$

$$L_{10} = 4430 \text{ mil. okr}$$

$$C = 13.8\text{kN} > C_1 = 3.8\text{kN}$$

$$L_{10} = 4430 \text{ mil. okr}$$

Zadovoljava

Ležaj oslonca B:

$$F_{B_H} = 0.97\text{kN}$$

$$F_{B_V} = 1.25\text{kN} - \text{težina sklopa turbine (pretpostavljena)}$$

$$d_2 = 45\text{mm}$$

$$\text{Sigurnost nošenja: } \frac{C}{P} = 5.32$$

Kuglični ležaj, katalog SKF: 6009-2RS1\*

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a = 2.39\text{kN}$$

$$X = 0.56$$

$$Y = 1.17$$

$$P_o = 1.21\text{kN}$$

$$L_{10} = 790 \text{ mil. okr}$$

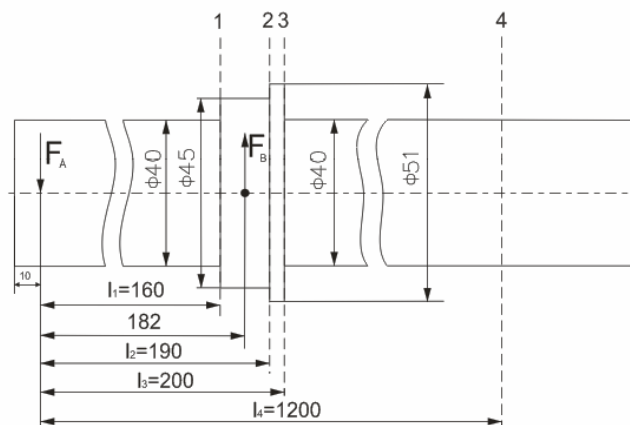
$$C_1 = P \left( \frac{C}{P} \right) = 2.39 \cdot 5.32 = 12.7\text{kN}$$

$$C = 22.1\text{kN} > C_1 = 12.7\text{kN}$$

Zadovoljava

$$C_o = 14.6\text{kN} > P_o = 1.21\text{kN}$$

Kontrolni proračun dinamičke sigurnosti:





Opterećenje vratila u pojedinim presjecima:

$$M_1 = F_A \cdot l_1 = 836 \cdot 160 = 133760 \text{ Nmm} \cong 133.8 \text{ Nm}$$

$$M_2 = F_A \cdot l_2 - F_B \cdot 8 = 836 \cdot 190 - 976 \cdot 8 = 151048 \text{ Nmm} \cong 151 \text{ Nm}$$

$$M_3 = F_A \cdot l_3 - F_B \cdot 18 = 836 \cdot 200 - 976 \cdot 18 = 149669 \text{ Nmm} \cong 150 \text{ Nm}$$

$$M_{red} = \sqrt{M_4^2 + 0.75(\alpha_0 \cdot T)^2}$$

$$M_4 = F_A \cdot l_4 - F_B \cdot 1.018 + q \cdot 1 \cdot 0.5 = 836 \cdot 1.2 - 974 \cdot 1.018 + 69 \cdot 1 \cdot 0.5 = 46.168 \text{ Nm}$$

$$T = 22 \text{ Nm}$$

$$M_{red} = \sqrt{46.168^2 + 0.75(0.73 \cdot 22)^2} = 48.2 \text{ Nm}$$

Kontrola postojeće sigurnosti u pojedinim presjecima:

$$S_{potr.} = f(TP\%, h_{b\max} \%) \quad TP=100\% \quad S_{potr.} = 1.4$$

Faktor udara:  $\rho = 1$

Presjek 1

$$S_{post.1} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\rho \cdot \beta_{kf} \cdot \sigma_{f1}} \geq S_{potr.}$$

$$\sigma_{f1} = \frac{M_1}{W_1} = \frac{133760}{3059} = 43.73 \text{ N/mm}^2$$

$$W_1 = \frac{\pi \cdot d_1^3}{32} (1 - k^4) = 0.1 \cdot 40^3 \cdot (1 - 0.85^4) = 3059 \text{ mm}^3 \quad k = \frac{d_2}{d_1} = \frac{34}{40} = 0.85$$

$$\sigma_{fDN} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$b_1 = f(d) = 0.85 \quad b_2 = 0.825 \text{ - za stupanj površinske hrapavosti N9}$$

$$R_{\max} = 6.3 \mu\text{m}$$

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 (\beta_{kf_2} - 1) = 1 + 0.55 (1.75 - 1) = 1.4125$$

$$R_m = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \beta_{kf_2} = 1.75 \quad c_1 = 0.55$$

$$S_{post.1} = \frac{0.85 \cdot 0.825 \cdot 240}{1 \cdot 1.4125 \cdot 43.73} = 2.72 > S_{potr.} = 1.4$$

## Presjek 2

$$S_{post.2} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\rho \cdot \beta_{kf} \cdot \sigma_{f2}} \geq S_{potr.}$$

$$\sigma_{f2} = \frac{M_2}{W_2} = \frac{151048}{2151} = 70 \text{ N/mm}^2$$

$$W_2 = \frac{\pi \cdot d_2^3}{32} (1 - k^4) = 0.1 \cdot 45^3 \cdot (1 - 0.76^4) = 2151 \text{ mm}^3 \quad k = \frac{d_2}{d_1} = \frac{34}{45} = 0.76$$

$$\sigma_{fDN} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$b_1 = 0.83 \quad b_2 = 0.99 \text{ - za stupanj površinske hrapavosti N5 } R_{\max} = 2.5 \mu\text{m}$$

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 (\beta_{kf_2} - 1) = 1 + 0.35 (2.3 - 1) = 1.455$$

$$R_m = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \beta_{kf_2} = 2.3 \quad c_1 = 0.35$$

$$S_{post.2} = \frac{0.83 \cdot 0.99 \cdot 240}{1 \cdot 1.455 \cdot 70} = 1.9 > S_{potr.} = 1.4$$

## Presjek 3

$$S_{post.3} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\rho \cdot \beta_{kf} \cdot \sigma_{f3}} \geq S_{potr.}$$

$$\sigma_{f3} = \frac{M_3}{W_3} = \frac{149669}{10592} = 14 \text{ N/mm}^2$$

$$W_3 = \frac{\pi \cdot d_3^3}{32} (1 - k^4) = 0.1 \cdot 51^3 \cdot (1 - 0.67^4) = 10592 \text{ mm}^3 \quad k = \frac{d_2}{d_1} = \frac{34}{51} = 0.67$$

$$\sigma_{fDN} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$b_1 = 0.82 \quad b_2 = 0.825 \text{ - za stupanj površinske hrapavosti N9}$$

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 (\beta_{kf_2} - 1) = 1 + 0.58 (2.25 - 1) = 1.725$$

$$R_m = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \beta_{kf_2} = 2.25 \quad c_1 = 0.58$$

$$S_{post.3} = \frac{0.82 \cdot 0.825 \cdot 240}{1 \cdot 1.725 \cdot 14} = 6.7 > S_{potr.} = 1.4$$

Presjek 4:

$$S_{post.4} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\rho \cdot \sigma_{red4}} \geq S_{potr.}$$

$$\sigma_{red4} = \frac{M_{red4}}{W_4} = \frac{48200}{3059} = 15.76 \frac{N}{mm^2} \quad W_4 = W_1$$

$$\sigma_{fDN} = 240 \frac{N}{mm^2}$$

$$b_1 = 0.85 \quad b_2 = 0.825 \text{ - za stupanj površinske hrapavosti N9}$$

$$S_{post.3} = \frac{0.85 \cdot 0.825 \cdot 240}{1 \cdot 15.76} = 10.68 > S_{potr.} = 1.4$$

### Elastične karakteristike vratila

Svojne elastične deformacije vratila izračunate su pomoću programa Beam calculator:

Moment tromosti za šuplji presjek

$$J_1 = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} (40^4 - 34^4) = 60066 mm^4$$

$$D = 40 mm$$

$$d = 34 mm$$

$$\text{Za čelik: } E = 200000 \frac{N}{mm^2}$$

Zakret elastične linije:

$$\text{U osloncu A } \beta = 0,00039 \text{ rad}$$

$$\text{U osloncu B } \beta = -0,00093 \text{ rad}$$

$$\text{Slobodni kraj } \beta = -0.012$$

Progib slobodnog kraja:

$$f = -18.9 mm$$

## **12. Prikaz 3D modela i troškova**

Model je izrađen pomoću programa Pro ENGINEER 3.0. Detaljno su prikazni svi dijelovi konstrukcije izuzev motora čiji je model izrađen samo zbog gabarita koji su potrebni za dimenzioniranje konstrukcije. Odabrani motor je GL-PMG-500A proizvođača GINLONG koji se bavi isključivo proizvodnjom dijelova za male vjetroturbine.

Cijene sličnih generatora kreću se između 1500 – 2500 kn ovisno o proizvođaču. Zbog procjene troškova uzima se da je cijena ovog generatora oko 1500 kn.



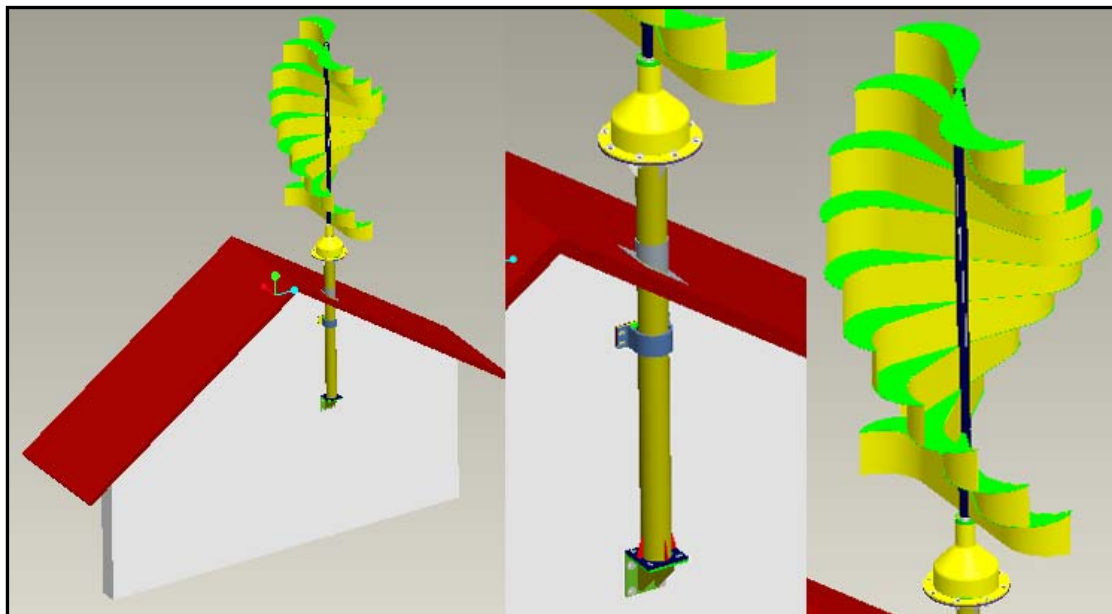
*Slika 12.1. Generator GL-PMG-500A*

Elektronički uređaji kao što su pretvarači, kontroleri te uređaji za spajanje na mrežu nisu tema razmatranja ovog diplomskog rada tako da su izostavljeni. Mehanički dijelovi koji su korišteni mogu se naći na tržištu po relativno niskim cijenama.

- Cijevi - 4.79kn/kg – ukupno 210 kn
- Lim svih debljina – 3,95kn/kg – ukupno 405kn
- Vijci, matice, podložne pločice – ukupno 100 kn
- Ležaj – 185 kn

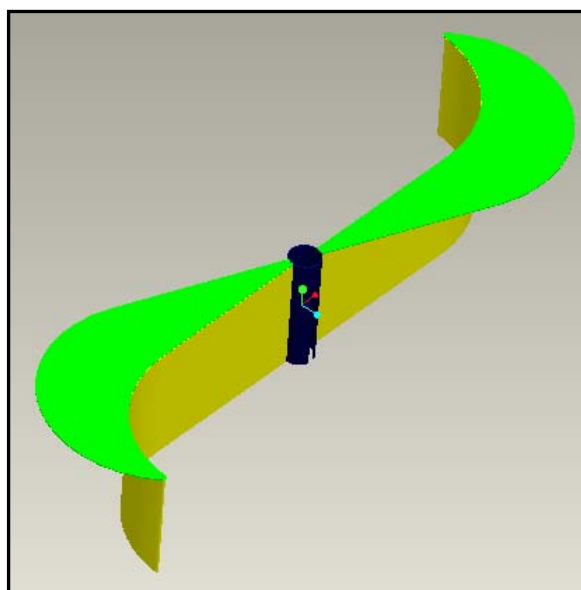
Ukupna cijena konstrukcije s PDV-om je: 900 kn

Model sklopa vjetroelektrane vidi se na slici. Nosač vjetroturbine pričvršćen je za bočni zid kuće vijcima. Stup nosača pričvršćen je nosačima na dva mjesta. Za donji nosač zavarom, a za bočni okovom i gumenim prstenom koji eliminira pojavu vibracija. Ispod nosača okova nalazi se gumena podloga koja onemogućava oštećenje fasade.



*Slika 12.2. 3D model sklopa vjetroelektrane*


Vjetroturbina je za nosač pričvršćena prirubnicom preko kućišta u kojem se nalazi generator. Vratilo je izravno povezano s generatorom te je tako uležišteno na jednoj strani, dok je drugo uležištenje na gornjem dijelu kućišta. Lopatice se na vratilo slažu modularno tj. sklop lopatica sa slike 12.3. sa svakim slijedećim modulom zakreće se za 22.5 stupnja.



*Slika 12.3. 3D model modula lopatica*

## **Zaključak**

Vertikalne vjetroeletkrane, globalno, predstavljaju veliki neiskorišten potencijal u području vjetroeeneretike, a razlozi su neznanje i veliki monopol horizontalnih vjetroeletkrana na tržištu. Ono što ove vjetroeletkrane stavlja bok uz bok horizontalnima jest neznatno manja snaga, a ono što im daje prednost na velikom broju potencijalnih lokacija jest mogućnost hvatanja vjetra iz svih smjerova i što je još važnije otpornost na udare vjetra i nagle promjene smjerova. U svakom slučaju kada se razmatra mogućnost postavljanja vjetroturbine na krov objekta mnogo je povoljnije odlučiti se za vertikalnu izvedbu jer su vjetrovi na nižim visinama uglavnom nestalni, brzo mijenjaju smjer, a zbog objekta kao prepreke javljaju se i turbulentne struje.

ativan aspekt nabave ovakve vjetroturbine u svakom je slučaju vrlo velika cijena pa se time cijena energenta ne smanjuje nego mnogostruko povećava. U slučaju da se cijena smanji, a to bi zahtijevalo masovnu proizvodnju vertikalnih vjetroeletkrana, ovakav način proizvodnje energije bio bi isplativiji. Još jedan problem koji se javlja jest pohrana ovako dobivene energije jer ni vjetar, a ni naša potrošnja nisu predvidivi. Ovaj se problem može riješiti na dva načina, jedan je kupnja vrlo skupih baterija koje nemaju dug vijek trajanja, a drugi je priključivanje na mrežu. Priključivanje na mrežu stvara novi problem jer nije jednostavno, a ukoliko bi se na mrežu spojilo mnoštvo ovakvih potrošača – proizvođača mreža bi postala nestabilna. Rješenje ovih problema zapravo ne ovisi o samom proizvodu već o sekundarnim čimbenicima pa je vrlo vjerojatno da će ovakav način proizvodnje energije morati pričekati dok se ne riješe probleme pohranjivanja energije.

Što se tiče samoodrživih objekata koji nemaju mogućnost spajanja na mrežu ovakav izvor električne energije predstavlja dobar izbor. U kombinaciji sa solarnim kolektorima i agregatom koji se pogoni bio dieselom moguće je dobiti zadovoljavajuću količinu el. energije.

Konstrukcijska izvedba ovakvog proizvoda nije upitna pa se tako na tržištu pojavljuje sve više proizvođača koji u svojem asortimanu nude ovakve uređaje. Odgovor na pitanje da li je ovakva investicija opravdana daje trenutna cijena el. energije koja je još uvijek dovoljno niska da bi se investiralo u ovakav uređaj.

Konstrukcija proizvoda izrađena u ovom radu cijenom je vrlo konkurentna no potrebno je testiranje kojim bi se odredila točna snaga. Nakon testiranja bilo bi moguće odrediti da li je ova vjetroturbina isplativa.

**Literatura:**

- [1] Pilić – Rabadan Lj., Vodne turbine i pumpe, vjetroturbine, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2000.
- [2] Mihetec M., Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [3] Greenwell D., A Brief Introduction to Wind Turbines, School of Engineering & Mathematical Sciences City University, London, 2008.
- [4] Danish Wind Industry Association, <http://www.windpower.org>, 2003.
- [5] Wikipedia, <http://www.wikipedia.org>
- [6] Skalicki B., Grilec J., Električni strojevi i pogoni, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- [7] Dizdarević N., Majstorović M., Bajs D., Majstorović G., Mrežna pravila za vjetroelektrane, Energetski institut Hrvoje Požar
- [8] Energija vjetra – prezentacija, <http://www.etfos.hr>, Elektrotehnički fakultet, Osijek
- [9] Knežević S., Izlaganje - Tehnologije vjetroelektrana, <http://www.hep.hr>, HEP – obnovljivi izvori energije d.o.o.
- [10] Horvath L., Karadža N., Primjena i korištenje energije vjetra, Energetski institut Hrvoje Požar, Graditeljska škola, Čakovec, 2007.
- [11] Helix Wind, <http://www.helixwind.com/en>
- [12] Quiet Revolution, [www.quietrevolution.co.uk](http://www.quietrevolution.co.uk)
- [13] Ginlong, <http://www.ginlong.com>
- [14] Decker K.H., Elementi strojeva, Tehnika knjiga, Zagreb, 1980.
- [15] Kraut B., Strojarski priručnik - deveto prerađeno i popunjeno hrvatsko ili srpsko izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
- [14] Horvat Z. i suradnici, Vratilo (Proračun), Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb